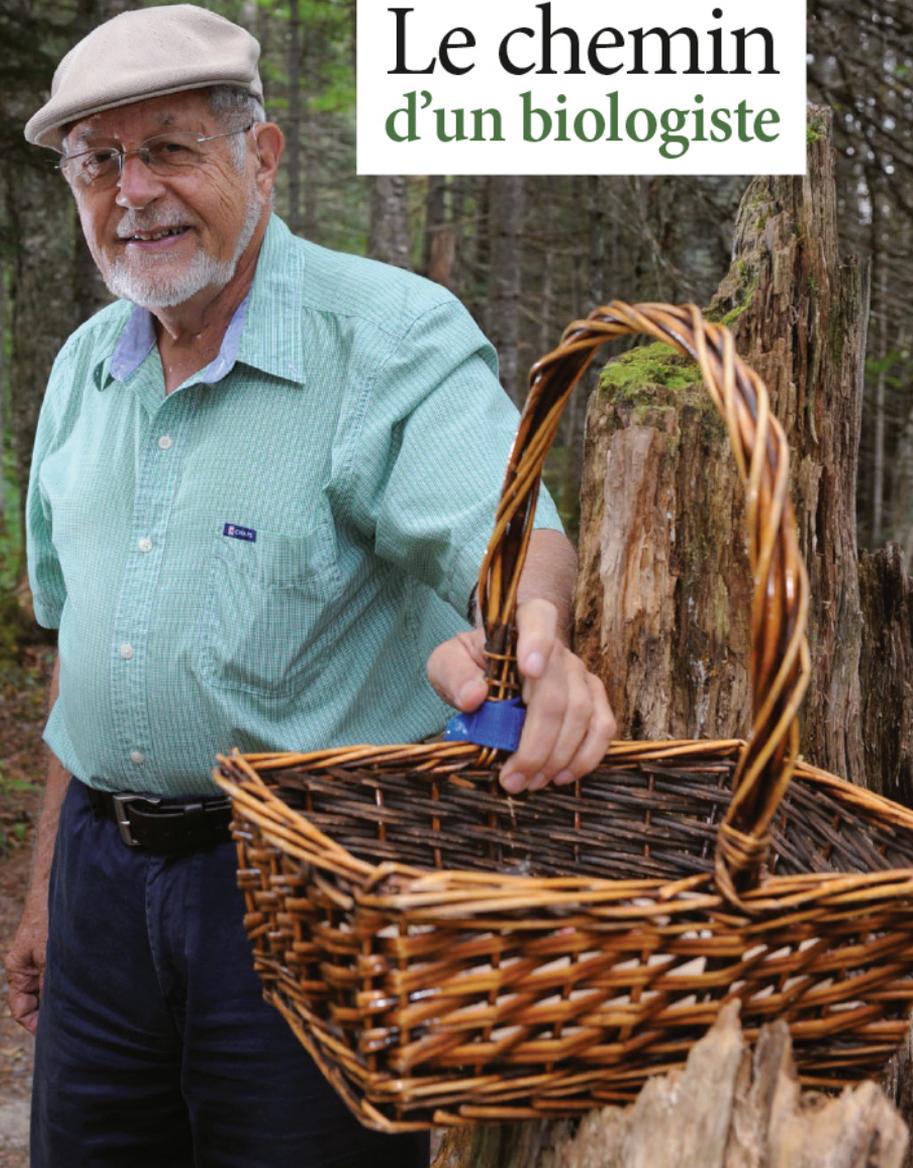


J. André Fortin

Le chemin d'un biologiste



Le chemin d'un biologiste

J. André Fortin

Le chemin
d'un biologiste

Conception graphique: Emmanuel Gagnon
Photographies de la page couverture: *Le Soleil*

© J. André Fortin, 2019

J. André Fortin
250, rue Grande-Allée Ouest, app. 1710
Québec (Québec) G1R 2H4
CANADA
j.andre.fortin@videotron.ca

IMPRIMÉ AU CANADA/PRINTED IN CANADA

AVANT-PROPOS

La vie d'un chercheur n'a absolument rien de tracé d'avance. La route de son parcours est loin d'être un boulevard. Elle prend plutôt l'allure de la traversée d'une forêt parsemée de défis inattendus et d'obstacles à franchir. Le seul repère est qu'il faut continuer à viser sans cesse le sommet, malgré certains reculs passagers. On ne peut donc pas parler d'un chemin tracé à l'avance, mais d'un trajet à découvrir à mesure de l'ascension.

Je pense avoir connu une carrière scientifique des plus valables, en commençant à une époque où la recherche scientifique en biologie végétale en était à ses premiers balbutiements au Québec. Mon intention première en écrivant ce livre a été de produire un document pouvant servir de source d'inspiration pour des étudiants intéressés par la recherche dans ce domaine.

J'ai voulu retracer les circonstances plus ou moins prévisibles qui m'ont conduit à m'intéresser à la nature, aux champignons en particulier. Arrivé précocement dans ma vie, cet intérêt a été nourri par des activités ne faisant pas partie des enseignements au collège et à l'université à ce moment.

Dans ce cheminement, j'ai rencontré des mentors, tels que René Pomerleau, Marcel Lortie et Bernard Bernier qui m'ont fait découvrir différentes dimensions de la science, me conduisant en fin de course à une approche intégrative de la science, plutôt que l'approche réductionniste habituelle qui consiste en des études de plus en plus pointues sur un même objet.

Mes études avancées, M.Sc. à l'Université du Wisconsin et Ph. D. en foresterie à l'Université Laval, m'y ont très bien préparé. Entre autres, mon stage à l'Institut Pasteur, à Paris, m'a ouvert la grande porte vers l'écologie microbienne du sol.

À partir de ces bases, j'ai eu le privilège de devenir professeur à l'Université Laval. C'est ainsi que j'ai eu accès à des subventions de recherche pendant toute ma carrière et dirigé près de 60 étudiants aux études avancées.

J'ai voyagé partout au Canada et dans le monde pour assister à des conférences internationales ou comme consultant dans des pays en développement.

Plusieurs des recherches effectuées avec mes étudiants ont conduit à des découvertes qui se traduisent aujourd'hui par des applications d'importance en foresterie, en agriculture et en environnement.

Tout au cours de ce cheminement, j'ai gardé un intérêt majeur pour la mycologie en collaborant entre autres avec le Cercle des mycologues amateurs de Québec. Ma participation au programme européen Micosilva à titre de consultant international m'a permis de découvrir une activité industrielle considérable sur la récolte, la transformation et la mise en marché des champignons sylvestres, ainsi que le mycotourisme. Ceci m'a amené à promouvoir cette filière au Québec avec des résultats étonnants.

Voici donc ce document susceptible d'intéresser à ce cheminement mes amis, mes collaborateurs et possiblement un public averti, mais surtout des jeunes qui cherchent leur chemin dans la forêt du monde scientifique.

J. André Fortin
18 janvier 2019

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	7
PREMIÈRE PARTIE	
Chapitre 1 – LES JEUNES ANNÉES	15
Le goût de la nature	15
L'influence du milieu familial	16
Le Cercle des mycologues amateurs de Québec	18
L'attrait de la biologie.....	19
L'intérêt pour la philosophie des sciences	20
CHAPITRE 2 – DE BIOLOGISTE EN HERBE AUX ÉTUDES UNIVERSITAIRES	23
Le baccalauréat en biologie à l'Université Laval.....	23
La découverte de la symbiose mycorhizienne.....	24
Premières lectures sur les mycorhizes	25
Survол des connaissances sur les mycorhizes à cette époque	27
CHAPITRE 3 – LES ÉTUDES GRADUÉES	29
Maîtrise en biologie végétale à l'Université du Wisconsin	29
Doctorat en foresterie à l'Université Laval	30
Stage à l'Institut Pasteur de Paris en écologie microbienne du sol	32
CHAPITRE 4 – L'ENSEIGNEMENT ET LA RECHERCHE À L'UNIVERSITÉ LAVAL	35
L'enseignement de premier cycle	35

Première demande de subvention au CRSNG.....	36
Membre du comité d'évaluation en biologie végétale	37
Le rapport Fortin/Barabé	38
Le Fonds de recherche Nature et technologies du Québec	39
Autres organismes subventionnaires.....	39
La première conférence nord-américaine sur les mycorhizes	40
CHAPITRE 5 – LES ANNÉES 1970: PREMIÈRES RÉALISATIONS	43
Les étudiants aux études supérieures	43
Travaux de restauration des sites affectés: Manic 5 et La Grande	46
La coopération internationale.....	49
État des connaissances sur les mycorhizes à la fin des années 1970.....	50
CHAPITRE 6 – LES CHEMINS DE LA DÉCOUVERTE	55
La culture sur Turface: une recherche appliquée aux conséquences majeures.....	55
Une rencontre déterminante avec Bernard Bélanger.....	56
Les étudiants aux études supérieures	57
Équipe sur la génétique des champignons ectomycorhiziens	63
DEUXIÈME PARTIE	
CHAPITRE 7 – LES ANNÉES 1990.....	73
Création du centre de recherche en biologie forestière à l'Université Laval.....	73

Table des matières

Directeur fondateur de l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV)	73
Les étudiants aux études supérieures	77
Collaboration avec Premier Tech.....	79
Nouveaux travaux à la Baie-James et à Manic- Outardes.....	79
La retraite	82
La coopération internationale.....	84
1 ^{re} Conférence internationale sur les champignons comestibles.....	85
Les morilles de feu	87
CHAPITRE 8 – RETOUR À LA RECHERCHE ET À L'ENSEIGNEMENT	89
Rentier, mais non retraité	89
Les premières productions industrielles d'inoculum mycorrhiziens	89
<i>In Vitro Culture of Mycorrhizas</i> , un livre en 2005	90
<i>4th International Conference on Mycorrhizae</i> à Montréal	91
Les champignonnières du Québec	92
Une subvention majeure du CRSNG pour étudier les champignons forestiers comestibles	93
Fondation de l'association pour la commercialisa- tion des champignons forestiers	95
Retour à mes anciennes amours	96
<i>Les mycorhizes: la nouvelle révolution verte</i>	97
Écologie intégrative des symbioses végétales: le cours.....	98
Micosylva.....	99
Un deuxième colloque international sur les champignons forestiers comestibles à Québec	101

CHAPITRE 9 – LES NOUVEAUX PARADIGMES	
DES ANNÉES 2010.....	103
Présidence du Cercle des mycologues amateurs de Québec	103
La mycophagie animale: un nouveau chantier	105
Le fameux <i>Rhizoglyphus irregularis</i> DAOM 197198: vedette internationale.....	108
Fertilité et nutrition des arbres, un nouveau paradigme	110
Une subvention pour examiner ce nouveau paradigme sur la nutrition des arbres.....	112
Le dépérissement des érablières.....	116
Découverte du mycorrhizobioime des plantes des plantes agricoles.....	117
<i>Les mycorhizes: l'essor de la nouvelle révolution verte</i>	120
Plaidoyer pour la modification des principes et des pratiques agricoles.....	121
Écologie intégrative des symbioses végétales.....	122
CHAPITRE 10 – LA CONCLUSION	
D'UNE BELLE HISTOIRE	125
Mes années-lumière.....	125
La découverte de l'année 2015 de <i>Québec Science</i>	125
La Semaine verte.....	126
Un colloque à la Faculté d'agriculture en janvier 2016	127
Le CRAAQ.....	127
Mycorhizes et sécurité alimentaire mondiale	128



PREMIÈRE PARTIE

Chapitre 1

LES JEUNES ANNÉES

Le goût de la nature

À l'occasion des conférences que je présente devant des auditoires des plus variés, je trouve toujours le moyen d'exprimer cette pensée: le plus beau cadeau que vous puissiez faire à vos enfants et petits-enfants, c'est de leur donner le goût de la nature.

Au cours de notre vie, chacun de nous doit se construire un système de valeurs, pour ne pas dire en termes plus savants, une philosophie de l'existence. C'est au cours de l'enfance et de la jeunesse qu'on jette les bases de cette construction. Cette dimension de l'éducation ne connaît pas de recette toute faite et chaque individu échafaude, modifie et développe son propre système. Mais, le milieu familial joue un rôle fondamental et de première heure dans cette démarche.

Un enfant qui, dans son jeune âge, est exposé uniquement au consumérisme effréné, au sport de contemplation, à l'égoïsme, à la compétition, etc., et ceci sans aucun cadre spirituel, laissera peu de place pour les valeurs immatérielles et conceptuelles. La générosité, le partage, la collaboration, la curiosité, la compassion, l'initiative, l'émerveillement et la créativité figurent parmi les nombreuses valeurs susceptibles de donner aux jeunes dès le départ, une assise solide pour la construction de leur système de valeurs.

Le goût de la nature permettra au jeune de consulter chaque jour le grand livre par excellence de la nature, qu'il trouvera partout sur son chemin. Celui-ci l'invitera à s'émerveiller devant un ciel étoilé, une mer déchaînée, un papillon qui butine, une salamandre qui se cache sous les pierres, l'activité d'un ver de terre, le parfum des fleurs et, j'espère! un champignon en développement. Avec les années, ces premières impressions favoriseront la curiosité, le questionnement, l'admiration et l'émerveillement devant l'infiniment petit, l'infiniment grand et l'infiniment complexe, tel le cerveau humain. Sur de telles bases, un jeune connaîtra un départ solide pour développer sa philosophie de l'existence pendant toute sa vie.

L'influence du milieu familial

Ce fut le cas dans mon milieu familial où l'on m'a donné le goût de la nature à un âge très précoce. Élevé dans le quartier Montcalm à Québec, j'avais un accès quotidien au magnifique Parc des champs de bataille, les Plaines d'Abraham. La vue du haut de ce promontoire me faisait rêver à des voyages là-bas dans les montagnes à perte de vue, ou sur le fleuve Saint-Laurent omniprésent. C'était une formidable fenêtre sur la nature. Les pique-niques et en particulier les longues marches dans les sous-bois avec mon père devaient prendre une tournure inattendue.

Mon père, Joseph-Louis, accordait une attention toute particulière aux arbres «à grosses graines», surtout les noyers noirs et cendrés, les marrons d'Inde et les chênes. Il avait établi une mini-pépinière en contrebas de la terrasse Gray pour y semer ces graines de grosseur impressionnante. Il savait qu'il lui fallait les mettre en terre dès l'automne, comme le fait la nature. Quelle ne fut pas la surprise de constater, tôt au printemps suivant, la présence de trous là où chaque noix avait été plantée l'automne précédent. Nous

avons rapidement compris que les écureuils en avaient fait leurs beaux jours. L'automne suivant, nous avons repris les semailles en prenant cette fois la précaution d'enfoncer une boîte de conserve vide par-dessus chaque semence, afin d'écartier ces rongeurs trop gourmands. Dès la fonte des neiges, nous allions toutes les fins de semaine visiter la pépinière. Nous avons pu constater que notre astuce avait fonctionné en observant l'absence de trous causés par les rongeurs. Quelle merveille ce fut d'observer ensuite l'émergence de ces gros cotylédons, suivie de l'élongation de la tige et du déploiement des vraies feuilles permettant déjà de reconnaître l'espèce d'arbre! L'année suivante, nous sommes allés transplanter ces jeunes arbres en différents endroits sur les Plaines. Aujourd'hui, lors de mes marches dans le Parc, en croisant un arbre de quelque 70 ans, je me demande toujours si celui-ci fait partie de ceux que nous avons jadis mis en terre.

Toujours sur les Plaines, mes promenades avec ma tante Suzanne Bardou ont aiguisé mon sens de l'observation. Cette tante, née en France, était une autodidacte pourvue d'une grande sensibilité pour tout ce qui est beau, soit la musique, la peinture, la littérature et surtout la nature. Dès la fin de la guerre, elle allait souvent en France retrouver cousins et cousines qui, parmi leurs activités, avaient l'habitude d'aller aux champignons, une pratique séculaire dans les vieux pays. De retour au Canada, elle voulait aller aux champignons, mais étant célibataire, elle n'avait personne pour l'accompagner en forêt. C'est ainsi que dès l'âge de 8-9 ans, j'ai découvert le merveilleux monde des champignons. Ces organismes aux formes et aux couleurs variées, aux odeurs parfois agréables parfois désagréables émergeant de la terre en quelques jours, ont capté mon imagination de façon indélébile.

J'avais à peine dix ans lorsque je fis mes premières excursions en solo. Je prenais le petit autobus carré et cahotant à la Jonction de Sillery, au coin des Érables et St-Cyrille, pour me rendre sur le site actuel de l'Université Laval. Une abondance de chênes et de pins blancs favorisait l'émergence d'une multitude d'espèces de champignons, dont les magnifiques amanites des Césars, comme on la nommait alors. J'ai pu observer sa naissance à partir d'une sphère parfaitement blanche dont elle émerge pour exposer et déployer lentement son chapeau d'un rouge éclatant, avant d'étaler son anneau formant une jupe sur les pieds. Je l'avais vue dans les livres de ma tante, je l'ai identifiée!

Au retour dans le petit autobus, mon panier débordait et j'avais hâte d'aller le montrer à ma tante. Les passagers ne voulaient pas s'asseoir à côté de moi et une bonne dame me dit un jour: est-ce que ta mère sait que tu t'amuses avec ces choses-là, c'est dangereux! J'ai alors compris que la connaissance permet de maîtriser les craintes et de se distinguer (hum! un peu snob...) de ceux qui n'ont pas la connaissance. Par la suite cette expérience a nourri ma soif de connaître.

Le Cercle des mycologues amateurs de Québec

En 1951, j'avais 14 ans. Le Dr René Pomerleau fondait le Cercle des mycologues amateurs de Québec (CMAQ) et publiait son premier volume, *Champignons de l'Est du Canada et des États-Unis*, dont je garde toujours mon exemplaire usé par le temps et surtout par son utilisation. Évidemment, ma tante Suzanne fut l'une des premières personnes à joindre le groupe, tout en m'entraînant dans son sillage. Ce ne fut pas facile. En ces temps-là, le CMAQ était réservé à une «élite», presque tous des universitaires, et les jeunes n'étaient pas bienvenus. Sans doute sensible aux charmes féminins, le Dr Pomerleau a pour ainsi dire accordé

une permission exceptionnelle à ma tante pour que je l'accompagne au cercle.

J'étais de toutes les excursions et déjà vers 16-17 ans je me souviens d'avoir fait une présentation issue de ma lecture du livre de Watson, un ethnologue américain ayant visité un lointain village du Mexique où les habitants consommaient des champignons hallucinogènes, mélangeant à la fois, la communion avec le pain et avec les champignons. Évidemment, le livre venait de ma tante Suzanne.

Si mon père et ma tante ont contribué de façon magistrale à me donner le goût de la nature, une autre rencontre devait accentuer cet engouement déjà bien ancré, c'est celle du cousin de mon meilleur ami d'enfance Henri Talbot, François Hamel. Déjà dans les années 1950, François était un ornithologue amateur passionné qui possédait en plus un exemplaire de la *Flore laurentienne* du frère Marie-Victorin. Je venais de mettre la main sur un volume qui me permettrait enfin d'identifier moi-même toutes ces plantes que j'observais dans la nature. Il a non seulement avivé mon goût de la nature, mais en plus celui de la science.

L'attrait de la biologie

C'est ainsi que j'ai développé un amour pour la biologie et ce ne fut surtout pas dans le cadre de mes études classiques au Séminaire de Québec, de 1950 à 1958. Le premier cours en biologie m'a été donné en classe de syntaxe par l'abbé Schteublez, d'origine suisse. Il passait en revue les différents groupes d'êtres vivants avec un peu de morphologie et d'anatomie. Il commença évidemment avec les bactéries, qu'il prononçait «bactou-oui», il nous a parlé des algues, des champignons et des plantes avant de passer au règne animal et à l'homme. J'y ai entendu pour la première fois le mot lichen, tout étonné de voir que des champignons pouvaient s'allier avec des algues pour donner quelque chose de

surprenant, ne ressemblant ni à une algue ni à un champignon et capable de pousser sur des pierres.

Par après, il m'a fallu attendre encore 5 ans, en première philosophie, pour assister à un deuxième cours de biologie. Quelle déception! Il s'agissait essentiellement d'un cours portant sur la biologie du corps humain destiné aux futurs médecins. Heureusement que j'avais mes activités avec mes amis mycologues et ornithologues pour entretenir la flamme! Les collègues du Séminaire trouvaient ces préoccupations bizarres, surtout le jour où je suis arrivé en classe de Belles-Lettres, avec un groupe d'armillaires couleur de miel, dans un bocal de formol.

L'intérêt pour la philosophie des sciences

Pendant mon cours classique, en plus de la biologie et de la mycologie, mes lectures ont porté surtout sur les sciences et notamment l'astronomie, la géologie, la minéralogie, les biographies de scientifiques célèbres, sans oublier la philosophie des sciences. J'ai été marqué par le livre de Jean Laloup intitulé *La science et l'humain*. Puis, un collègue m'a fait découvrir les écrits de Teilhard de Chardin, un prêtre jésuite ayant participé aux fouilles archéologiques, notamment en Chine, à la recherche de fossiles d'hommes primitifs. Il faut savoir que son ordre lui avait interdit de publier ses idées et il aura fallu attendre sa mort avant que ses manuscrits sortent des oubliettes. Bien entendu, il était interdit de lire ces livres totalement absents des bibliothèques au Séminaire. Les Jésuites étaient plus tolérants en cette matière. C'est donc avec ardeur que j'ai dévoré les quatre livres, avec une préoccupation de concilier mon amour de la science avec les dictats de l'Église catholique. Dans *Le phénomène humain*, Teilhard faisait l'histoire évolutive des diverses étapes de développement des civilisations primitives. Je trouvais chez lui une piste rafraîchissante, qui continue

toujours de nourrir mes travaux et pensées sur l'évolution dans la symbiose. Dans *Sur les chemins de l'évolution*, Teilhard parle de phylums convergents et phylums divergents. Les phylums divergents disparaissent alors que les phylums convergents mènent à l'émergence de nouvelles formes d'existence, la convergence ultime se retrouvant au point oméga. Mon intérêt pour la symbiose étant naissant, j'ai trouvé là une possibilité de conciliation entre science et religion.

Pourtant, en 1958, cent ans après la publication du livre de Charles Darwin, *L'Origine des espèces*, j'ai demandé au préfet des études du Séminaire s'il fallait croire à l'histoire du paradis terrestre, à la création du monde en sept jours, etc. Quelle ne fut pas ma stupéfaction de me faire dire, bien sûr monsieur Fortin. Ce fut la rupture. À partir de ce jour, j'ai décidé de m'occuper de ma spiritualité moi-même en suivant la piste de Teilhard.

Chapitre 2

DE BIOLOGISTE EN HERBE AUX ÉTUDES UNIVERSITAIRES

Le baccalauréat en biologie à l'Université Laval

Ainsi, mon cours classique arrivait à sa fin et le temps était venu de «choisir un ruban», c'est-à-dire d'annoncer dans quelle discipline je souhaitais entreprendre des études universitaires. J'ai évidemment opté pour la biologie. Ça a fait jaser dans la famille; mes parents étaient un peu déçus des sacrifices qu'ils avaient faits pour me conduire à l'université. La médecine, le droit, les lettres d'abord, les génies, passe encore, mais la biologie? Une autre de mes tantes, célibataire et très religieuse, disait à mes parents, ne le laissez pas aller en biologie, il va perdre la foi!

À cette époque, le département de biologie était situé boulevard de l'Entente au cinquième étage du Pavillon des mines, à Québec. Nous étions six nouveaux étudiants et c'était parti pour quatre ans. En plus des cours de mathématique, physique, chimie et biochimie pris en commun avec les étudiants des autres départements, les 5-6 professeurs de biologie s'occupaient des différentes matières. Quelques professeurs de l'extérieur prenaient des tâches ponctuelles pour des matières spécifiques. On ne se surprendra pas d'apprendre que le curriculum était fortement axé sur la vie animale, avec un seul professeur de botanique, un généticien à temps partiel et un écologiste, arrivé pendant ma dernière année de l'université. Somme toute, ce fut une bonne forma-

tion nous ayant conduits à la promotion comportant le plus grand nombre (5) de finissants en biologie jamais connu, une consœur nous ayant quittés en cours de route pour se diriger vers la médecine.

Dans nos cours, nous avons beaucoup d'enseignement descriptif: anatomie, histologie, cytologie embryologie, survol du règne végétal et animal, taxonomie, etc. La biologie fonctionnelle se limitait à la génétique et à quelques notions de physiologie végétale dans le cours de botanique. Il y avait également un enseignement en physiologie animale couplé avec un cours de nutrition. Dans le cours de cytologie, nous avons appris à ce moment que Watson et Crick venaient tout juste de découvrir le secret de la double hélice de l'ADN.

Au cours de la dernière année est arrivé de Belgique, Lucien Huot, un entomologiste détenteur d'un doctorat, comme assistant d'enseignement. Enfin quelqu'un qui travaillait chaque jour à des expériences sur la physiologie des insectes. Pour dire que ceci m'a marqué, je sais toujours qu'il travaillait sur l'effet de la réserpine sur les *corpora allata* (cerveau) du *Tribolium confusum* (le ver de la farine). Avec lui, j'ai pu suivre en solo une initiation à la recherche expérimentale comportant diverses analyses physico-chimiques. Je me souviens d'avoir mesuré le phosphore par la spectroscopie du phosphomolybdate, dans l'herbe verdie autour des ronds de sorcières formés par les marasmes des Oréades. La concentration s'en trouvait doublée sous l'influence du compostage rapide des herbes mortes par le champignon. J'ai également appris à identifier les acides aminés par chromatographie sur papier, une technique révolutionnaire à l'époque.

La découverte de la symbiose mycorhizienne

Dès 1959, à la demande du Dr Pomerleau, j'ai eu le privilège d'obtenir un emploi d'été au Centre de recherche en biologie forestière du Canada, récemment fondé, logeant provisoire-

ment dans ce qui est aujourd’hui le pavillon Abiti-Price de l’Université Laval. Évidemment, René Pomerleau faisait partie de la direction comme chercheur chevronné en pathologie forestière. À ce moment, il menait une recherche sur le dépérissement des bouleaux que l’on appelait la mort en cime, caractérisée par un dessèchement des jeunes branches gagnant progressivement les parties basses de l’arbre. Le spectacle de ces arbres mourants a été fixé dans le temps par des peintres paysagistes canadiens appelés le «Groupe des sept».

Toutes les recherches à ce jour n’avaient pas réussi à déterminer la cause de cette maladie mortelle pour les arbres. Un chercheur du Nouveau-Brunswick avait suggéré que le réchauffement des sols (avant l’heure) pourrait peut-être exercer un effet néfaste sur les mycorhizes de ces arbres. René Pomerleau avait placé dans des bacs d’environ un mètre carré et sous éclairage artificiel, une douzaine de plants de bouleaux. Avant d’y déposer le sol venant de la forêt, il avait pris soin de placer des câbles chauffants permettant aux substrats d’atteindre diverses températures. L’expérience ayant été faite au cours de l’hiver, lorsque je suis arrivé au Centre en mai, il était temps d’en noter les résultats. On m’a demandé d’assister un technicien pour prélever les plants et observer si ces mystérieuses mycorhizes avaient survécu aux températures élevées. En extrayant les systèmes racinaires du sol, j’ai pu apercevoir du mycélium de champignons rattaché aux racines fines des bouleaux. Ce fut la première fois que j’ai pu observer des mycorhizes; elles avaient une odeur de champignon. Cette vision a eu un impact déterminant sur mon cheminement scientifique.

Premières lectures sur les mycorhizes

Dès lors, il fallait tout savoir sur ces fameuses mycorhizes. À cette époque, où Internet n’existait pas, les bibliothèques

du monde avaient pris l'habitude d'échanger publications et tirés à part. L'université Laval publiant *Le Naturaliste canadien*, le faisait sans doute parvenir à la Station de Rothamsted en Angleterre, laquelle en échange envoyait à l'Université Laval les tirés à part des travaux de ses chercheurs. Toujours est-il qu'un tiré à part d'un article scientifique de Barbara Mosse provenant de cette station s'est retrouvé sur une chaise, empilé avec beaucoup d'autres, à l'entrée de la petite bibliothèque du Département de biologie. La responsable nous encourageait à prendre ceux qui nous intéressaient. Cette publication de Barbara Mosse, parue dans *Nature* en 1957, était intitulée: *Growth and chemical composition of mycorrhizal and non-mycorrhizal apple*. On peut dire aujourd'hui que cette publication a servi de germe pour préparer la révolution verte présentement en marche et à laquelle nous contribuons. Ce que cette publication m'a enseigné de neuf, c'est que l'association mycorhizienne n'était pas limitée aux orchidées connues depuis Claude Bernard et au début du 20^e siècle, ni aux arbres avec leurs champignons à chapeaux, mais qu'elles étaient également non seulement présentes chez une foule de plantes agricoles, mais qu'en plus elles étaient capables d'accélérer la croissance de ces plantes en augmentant leur contenu en nutriment, notamment en phosphore.

Puis ce fut la découverte du célèbre livre de John Laker Harley (Jack pour les intimes) intitulé: *The Biology of Mycorrhiza*, en 1959. Peu familier avec l'anglais, j'ai lu le livre d'une couverture à l'autre à trois reprises, la première fois avec l'aide constante du dictionnaire et la troisième fois sans en avoir besoin. Une excellente façon d'apprendre une langue lorsque le travail est motivé par une passion pour le sujet. Il était désormais clair que je ferais mes études avancées sur ce sujet. Le volume de Bernard Boulard de Rouen également

publié en 1959: *Sols, microflore et végétation* a aussi contribué à nourrir mon intérêt pour cette symbiose

Cette passion a été alimentée par mes travaux d'étudiant d'été dans l'équipe du Dr Pomerleau et par ma participation au CMAQ plutôt que par le contenu de mes cours universitaires. Au Centre de recherche en biologie forestière, devenu le Centre forestier des Laurentides, plusieurs jeunes chercheurs préparaient leurs thèses de doctorat. Tous sans exception travaillaient sur des champignons pathogènes produisant chez les arbres, des caries, des chancre, des flétrissures, des pourritures... Ce contraste avec les activités bénéfiques des champignons mycorhiziens m'a sans doute déterminé encore plus fermement à choisir l'étude des mycorhizes, impliquant des champignons utiles.

Dans ce contexte, j'ai rencontré mon mentor, Marcel Lortie, qui préparait alors une thèse sur le chancre necrien du bouleau jaune. Il devait poursuivre, en plus de sa recherche, des travaux de terrain sur le dépérissement des bouleaux à papier. Un très grand nombre de places d'observations avaient été implantées partout dans la province, et c'est ainsi qu'au cours d'un été, j'ai eu l'occasion de visiter toutes les régions du Québec, de la Côte-Nord à la Gaspésie, de la Mauricie à l'Abitibi, de Charlevoix au Lac-Saint-Jean. Au cours de ces voyages, je découvrais mon morceau de pays, ses forêts variées et les gens qui les habitent. Dire que j'étais payé en plus pour vivre ces expériences déjà enrichissantes!

À travers cette étape de mon cheminement, c'est en 1962 que furent complétées mes études de baccalauréat en sciences. J'avais déjà 25 ans!

Survол des connaissances sur les mycorhizes à cette époque

Le terme mycorhize (*mukes* = champignon et *rhiza* = racine) a été proposé pour cette symbiose par Frank en 1885 et repris

par Noël Bernard en 1909 pour les orchidées. C'est en 1925 qu'Elias Melin, un Suédois, a démontré rigoureusement la relation entre les ectomycorhizes des arbres et les champignons à chapeau des sous-bois. Ayant mis en culture pure des bolets, il les a inoculés sur des plantules de pins en conditions aseptiques; ainsi, il a pu obtenir des structures racinaires identiques à celles observées par Frank et omniprésentes chez les conifères de la Scandinavie. En 1937, Hatch, un Américain, a démontré pour la première fois que les ectomycorhizes des arbres jouent un rôle dans l'absorption des éléments nutritifs, notamment le phosphore, et c'est à la fin des années 1950 que Harley a découvert le mécanisme physiologique par lequel l'arbre transfère des sucres vers le champignon, démontrant ainsi la nature symbiotique des ectomycorhizes. Après des années d'observation de l'omniprésence de structures fongiques intraracinaires chez une grande majorité de plantes, les phytopathologistes les classaient encore parmi les pathogènes bénins.

La démonstration de Mosse à la fin des années 1950 devait changer à tout jamais l'histoire de la biologie végétale. Ayant observé de grosses spores au voisinage de racine de fraisiers, elle a inoculé des boutures de pommier avec ces spores, après les avoir stérilisées en surface. En plus des structures intraracinaires en forme d'arbuscules si longtemps observées, elle a obtenu un meilleur développement des jeunes pommiers et noté leur enrichissement en phosphore. Finalement, elle a pu retrouver une abondance de spores dans le substrat, identiques à celles inoculées au départ. C'est ainsi que l'étude des mycorhizes arbusculaires, notamment chez les plantes agricoles est née. Pourtant, encore en 1970, les dictionnaires français de l'époque décrivaient sous le terme mycorhize, l'association des orchidées avec des champignons.

Chapitre 3

LES ÉTUDES GRADUÉES

Maîtrise à l'Université du Wisconsin

Marcel Lortie fut pour moi un mentor exceptionnel. C'était un personnage créatif et de grande envergure, ayant laissé ses traces dans le monde de l'éducation avec sa participation à la Commission Parent. On a donné son nom au centre social de la Commission scolaire des Premières seigneuries. Il m'a d'abord dirigé vers l'Université du Wisconsin, dont il avait lui-même obtenu son doctorat. Ainsi, j'ai pu décrocher une bourse du Wisconsin Alumni Research Foundation (WARF) pour préparer une maîtrise.

Mes études se firent sous la direction du professeur Paul Allen. Ses propres recherches portaient sur la rouille du blé, en particulier sur les relations cytologiques lorsque le champignon rejoint les cellules internes, après pénétration du mycélium dans la feuille via les ostioles des stomates. De la vraie science pour moi. Il a souscrit à mon intérêt pour les mycorhizes et m'a mis sur une piste originale. Ainsi, il m'a remis une publication récente de Ragio et Ragio décrivant comment ces auteurs avaient obtenu des nodules à rhizobium fixateurs d'azote symbiotiques avec les légumineuses. Il s'agissait pour moi de produire cette fois des ectomycorhizes sur des explants racinaires, c'est-à-dire sur les racines de plants de pin dépourvus de leur tige. J'ai ainsi cultivé dans des plaques de Petri ces racines qu'il fallait nourrir avec les produits normalement reçus de la tige, soit des sucres et des vitamines, le tout contenu dans de la gélose placée

dans une toute petite fiole. Il suffisait de couper la tige du pin et d'enfoncer ce qui en restait dans la gélose, la racine s'étendant dans un sol artificiel (vermiculite). Toutes ces manipulations devaient se faire de façon stérile, y compris la culture du champignon mycorhizien et son inoculation sur la jeune racine, avant de refermer et sceller la plaque de Petri: de la vraie recherche!

Quelle ne fut pas ma satisfaction de voir ces mycorhizes de l'amanite rougissante se développer sous mes yeux aidés d'une loupe binoculaire. J'ai pu observer leur approche choisissant les racines courtes, les enveloppant de leur mycélium avant d'étendre leur mycélium et envahir l'ensemble de la vermiculite. Cette petite découverte aura des suites sur l'ensemble de ma carrière et on en retrouve aujourd'hui les traces dans la production industrielle des inoculums mycorhiziens arbusculaires utilisés en agriculture sur des millions d'hectares, partout dans le monde. C'est une histoire à suivre au cours de ce long cheminement, débutant avec une recherche guidée par la curiosité et une application pratique révolutionnaire en agriculture 50 ans plus tard, soit la culture cette fois des champignons responsables des mycorhizes arbusculaires sur des racines isolées de carottes.

Doctorat en foresterie à l'Université Laval

Après ces études de maîtrise, tout compte fait réussies, je reviens à Québec en 1964 pour entreprendre des études doctorales et où je retrouve mon mentor, Marcel Lortie. Très rapidement, il me trouve une bourse auprès du ministère de l'Agriculture pour travailler en foresterie. À cette époque, la recherche avait peu de place au ministère des Terres et Forêts. Il m'ouvrit les portes d'un laboratoire tout équipé, immense pour l'époque, où je travaillais seul. J'ai reçu de plus le soutien du professeur André Lafond, également intéressé par mes travaux et qui en a absorbé les frais.

J'avais le feu vert pour mener les recherches que je voudrais, bien sûr, sur les mycorhizes! La physiologie m'attirait beaucoup en cette époque de découverte des hormones végétales. Ce qui est devenu aujourd'hui le Service canadien des forêts avait engagé quelques années plus tôt, V. Slankis, en Ontario, un chercheur suédois ayant démontré la production d'auxine par les champignons ectomycorhiziens des arbres. C'est ainsi que j'ai entrepris des travaux sur les relations hormonales entre les champignons ectomycorhiziens et leurs hôtes. Il semble que j'ai toujours été idéaliste. Mon totem dans le scoutisme était « aigle des cimes » et dans l'album de graduation au séminaire, on avait inscrit sous ma photo: Le monde sera meilleur parce que j'aurai vécu. Ça m'avait un peu vexé! Dans cette veine, il fallait que ma thèse, pour être valable, débouche sur l'énoncé d'une théorie inédite. C'est ainsi que j'ai tenté d'échafauder ma théorie dite de l'équilibre symbiotique. Celle-ci consistait à expliquer comment la plante empêche le champignon de devenir trop agressif et de maintenir un état symbiotique équilibré. Ce qu'il y a de malheureux dans cette histoire, c'est que mes publications appuyant cette théorie, sauf celle portant sur les lichens où on retrouve un phénomène similaire, ont été publiées en français dans une revue suédoise multilingue. Très peu de chercheurs à travers le monde ont donc eu accès à mes écrits, de sorte que cette théorie n'a jamais (encore) vraiment émergé dans la communauté scientifique internationale.

À quelque chose malheur est bon. C'est ainsi que j'ai compris dès 1968 que la langue anglaise est la langue universelle permettant à la communauté scientifique de se parler et de progresser.

Pourtant, je trouve toujours que la langue française est une langue belle avec des mots superbes, qui porte son histoire à travers ses accents...

Finalement à l'automne 1966, j'ai déposé une thèse intitulée: *Rôle des régulateurs de croissance dans la formation des mycorhizes ectotrophes*, laquelle m'a valu d'obtenir le premier doctorat en foresterie jamais décerné par la Faculté de foresterie et de géodésie de l'Université Laval. Ceux qui voudraient en savoir plus pourront lire cette thèse déposée en 1967 à l'Université Laval.

Le soir même de ma défense de thèse, le doyen de l'époque avait organisé un copieux repas au Cercle universitaire de la rue d'Auteuil, réunissant quelque 25 convives! Il s'agit d'une époque révolue. On n'imagine même pas ce qu'il en coûterait aujourd'hui si chaque remise de doctorat devait être suivie de telles agapes.

Cette étape majeure ouvrait une autre phase de mon cheminement, celle du professeur d'Université.

Stage à l'Institut Pasteur de Paris en écologie microbienne du sol

Parmi les professeurs collègues de la Faculté de foresterie, le meilleur scientifique était sans doute Bernard Bernier, détenteur d'un doctorat en pédologie obtenu en Angleterre. Il avait un intérêt certain pour les microorganismes du sol et mon implication dans l'étude des mycorhizes l'intéressait beaucoup. Cette rencontre devait s'avérer un point tournant dans mon cheminement scientifique; ses effets se font toujours sentir.

Ayant été moi-même formé comme biologiste et m'étant spécialisé en physiologie, j'avais une démarche analytique qui m'amenait à conduire des recherches pointues, de plus en plus précises sur des objets restreints, sans trop de préoccupation pour leur remise en contexte dans une vision élargie du monde vivant.

À ce moment, Pochon et Barjac, de l'Institut Pasteur, venaient de publier leur imposant volume intitulé *Écologie microbienne du sol*. Chaque année en septembre, ils offraient un mois de formation à Paris avec cours théoriques le matin et travaux pratiques en après-midi. Bernard m'a non seulement sensibilisé à cette formation, mais à trouver les moyens financiers pour que je puisse aller à Paris faire ce stage, en septembre 1967. En plus de découvrir Paris, j'ai eu accès à un enseignement exceptionnel venant de deux personnes ayant mené des recherches sur la question depuis de nombreuses années et qui enseignaient non pas avec un livre quelconque, mais avec celui qu'ils avaient écrit eux-mêmes.

À cette époque, les professeurs d'écologie étaient braqués sur la description des écosystèmes du monde ou, comme on le fait encore de nos jours, sur la biodiversité. Au Québec, on décrivait le cortège floristique des divers types d'écosystèmes forestiers : pessières, sapinières, érablières, etc. On décrivait également les sols rattachés à chacun de ces écosystèmes, mais ceci était statique, sauf pour Bernard Bernier. Mes antécédents de physiologiste me poussaient à mettre l'accent sur le fonctionnement de ces écosystèmes, en particulier les relations sol-plante, avec une attention particulière pour les symbioses mycorhiziennes.

Cette étape de ma vie a été déterminante en m'ouvrant une fenêtre élargie sur la vie des organismes vivants comme membres d'écosystèmes. Cette vision allait me donner les ailes qu'il fallait pour développer les idées que je présente aujourd'hui sous le titre de *Écologie intégrative des symbioses végétales* en l'exprimant avec cette paraphrase qui résume tout : La symbiose mycorhizienne, un phénomène fondamental et universel dans l'évolution et le fonctionnement des plantes et des écosystèmes terrestres.

Chapitre 4

L'ENSEIGNEMENT ET LA RECHERCHE À L'UNIVERSITÉ LAVAL

L'enseignement de premier cycle

Cette période a débuté avant même la défense de ma thèse de Ph. D. Deux professeurs chevronnés de la faculté avaient hâte de diminuer leurs tâches d'enseignement, jusqu'au point de me bousculer gentiment pour que je termine rapidement cette thèse. Ainsi, dès septembre 1966, je me suis présenté devant une trentaine d'étudiants pour leur enseigner la botanique et, en janvier 1967, la physiologie végétale.

Cette période me fut très pénible pour plusieurs raisons. D'abord, je ne m'étais pas préparé pour prendre subitement cette responsabilité, d'autre part je détestais devoir présenter ces matières dans des livres écrits par d'autres. Enfin, j'ai constaté à cette occasion que j'avais un problème d'audition, ce qui n'est pas sans conséquence pour un enseignant. Une opération dans une oreille devait améliorer légèrement la situation en attendant d'obtenir des appareils auditifs quelque 20 ans plus tard. D'autre part, ces tâches d'enseignement empiétaient joliment sur mes activités de recherche, ma passion première. J'ai souvent pensé quitter l'université pour le Laboratoire de biologie forestière, maintenant le Centre forestier des Laurentides.

Autant j'ai pu détester l'enseignement à ce moment, autant je l'adore maintenant, surtout parce que j'enseigne ce qui se retrouve dans le livre de ma vie et m'habite totalement.

D'autre part, ayant eu une formation en biologie, je souhaitais de tout cœur avoir un poste de professeur non pas en foresterie, mais en biologie.

Le département de biologie ainsi que la Faculté d'agriculture venaient à peine d'arriver sur le campus. Cette dernière voulait s'emparer de tout l'enseignement de la biologie végétale, y inclus celui dispensé en foresterie. Le doyen de ma faculté s'étant carrément opposé à cette idée, le Département de biologie a fait un pacte avec la Faculté d'agriculture, selon lequel que le département s'occuperait de la zoologie et de la biologie marine alors l'autre faculté prendrait en charge la biologie végétale. Ceci devait avoir pour moi des conséquences souvent désagréables jusqu'en 1990, au moment de partir comme directeur fondateur de l'Institut de recherche en biologie végétale avec l'Université de Montréal et le Jardin botanique. On verra encore une fois qu'un malheur apporte souvent quelque chose de bon.

Première demande de subvention au CRSNG

Dans ma faculté, aucun professeur ne détenait une subvention du Conseil national de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG). Quelques rares collègues du Département de biologie détenaient de telles subventions, notamment Jean Lafontaine, dont les fonds provenaient du Comité de biologie cellulaire. Pour ma part, je devais postuler auprès du Comité de biologie végétale.

Jean Lafontaine, plus âgé de quelques années, agissait comme évaluateur des demandes dans son domaine et avait développé une bonne connaissance sur la façon de monter et de présenter une demande de subvention. J'ai ainsi passé plusieurs heures avec lui à examiner mes brouillons et à réécrire mon document. Il m'a appris à sélectionner un thème spécifique, suivi d'une mise en situation basée sur la littérature existante et à définir un objectif général suivi de trois

sous-objectifs (hypothèses). Ensuite venait la description des méthodologies pour atteindre ces objectifs, une section sur la signification scientifique, la portée pratique éventuelle des résultats obtenus et finalement un budget.

On ne sera pas surpris d'apprendre que cette première demande portait sur la finalisation de ma théorie sur l'équilibre symbiotique que je n'avais pas pu terminer, dans la précipitation avec laquelle on m'avait poussé vers un dépôt hâtif de ma thèse pour les raisons que l'on sait.

Toujours est-il que j'ai obtenu une première subvention de 3500 \$ par année pour trois ans, la moitié de mon salaire de professeur. C'était parti pour ne jamais s'arrêter, jusqu'à mon départ à la retraite en 1997, où le montant annuel atteignait près de 70000 \$ par année.

Membre du comité d'évaluation CRSNG en biologie végétale

Après avoir obtenu trois ans plus tard une deuxième subvention de trois ans, on m'a invité à faire partie du Comité des pairs en biologie végétale pour l'évaluation des demandes de subvention dans ce domaine venant de l'ensemble du pays. Un peu comme Xavier Dolan à Cannes en 2015, ce fut toute une école de formation qui a changé ma façon de concevoir et de mener une recherche. Il faut savoir qu'à cette époque, tout chercheur ayant déposé une demande de subvention recevait la visite de trois membres du comité évaluateurs. Cette activité m'a conduit d'un océan à l'autre. J'ai eu l'occasion de côtoyer la majorité des chercheurs canadiens dans mon domaine à cette époque, sans compter les nombreuses heures passées dans les avions et les hôtels avec des collègues chevronnés.

Un des côtés quelques fois désagréables de cette participation, ce fut au retour dans mon université, lorsque les

applications de collègues d'une autre faculté n'ont pas reçu de subvention. Immédiatement, ils conclurent qu'ils avaient été trahis. Et ceci a eu des séquelles pendant des années. Il faut savoir que lorsque le temps est venu pour un comité d'examiner une demande d'un collègue de sa propre université, ce membre du comité doit sortir de la salle. Les collègues anglophones, contrairement à ce qui était véhiculé au Québec, montraient une rigueur exemplaire dans l'accomplissement de cette tâche.

Après un premier mandat, faute d'autres francophones détenteurs de subvention en biologie végétale, on m'a demandé de façon exceptionnelle d'en prendre un deuxième, ce que j'ai accepté avec beaucoup d'hésitations.

Le rapport Fortin/Barabé

Au retour de mon dernier mandat, ayant constaté le peu de succès obtenu par des Québécois en biologie végétale, je me suis associé avec Denis Barabé du Jardin botanique pour produire un document étoffé montrant que les sommes d'argent obtenues par des universitaires québécois ne dépassaient pas 4% de l'enveloppe globale.

Saisi de cette question, Gilles Julien alors vice-président du CRSNG est arrivé à la conclusion que les universités du Québec et notamment les facultés d'applications ne posaient pas l'obligation de détenir un doctorat comme condition préalable pour occuper un poste de professeur. Afin de modifier cette tendance, le CRSNG a mis à la disposition des universités francophones un quota de bourses postdoctorales afin de recruter d'éventuels professeurs, à la suite d'une ou deux années de stage. C'est ainsi que j'ai pu moi-même recruter un candidat qui est devenu mon collègue à la Faculté de foresterie et géodésie: Maurice Lalonde.

Le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT)

Au cours des années, le nom de ce fonds a changé plus d'une fois. À l'origine, c'était le Fonds pour la formation de chercheurs et d'aide à la recherche (FCAR). Enfin, le gouvernement s'impliquait dans le fonctionnement de la recherche universitaire. Afin de ne pas dupliquer les programmes du CRSNG, on a opté pour le soutien aux équipes de recherche. Ceci devait s'avérer une excellente décision. Au départ, fasciné par le système du CRSNG, j'étais sceptique par rapport à ce programme, mais rapidement j'ai adhéré et proposé une équipe en biologie des sols. Ayant obtenu le soutien du jury, on m'a immédiatement demandé de faire partie du comité d'évaluation. Ce fut pour moi, encore une fois, une excellente école d'apprentissage sur la constitution des équipes.

J'ai par la suite maintenu des équipes en utilisant ce programme jusqu'à la fondation du Centre de recherche en biologie forestière (CRBF) de l'Université Laval et l'Institut de recherche en biologie végétale de l'Université de Montréal (IRBV).

Autres organismes subventionnaires

La machine étant partie, les participations aux comités d'évaluation se sont multipliées à l'échelle provinciale, nationale et internationale. Tour à tour ce furent le Comité d'expert de l'International Foundation for Sciences (Suède), le Comité des subventions stratégiques du CRSNG, le jury CRDI pour les programmes avec les pays en développement, le programme de l'OTAN en biotechnologie et douze autres... Tout ceci pour dire que les participations dans ces nombreux jurys ont développé chez moi une connaissance exceptionnelle sur la façon de concevoir et de soumettre des propositions de recherche à toutes les échelles, tout en faisant la connaissance de scientifiques d'envergure dans plusieurs pays.

(On verra qu'après ma retraite cette expertise m'a encore servi pendant de nombreuses années et encore récemment pour mettre sur pied des équipes de recherche capables d'innover et de soumettre des paradigmes inédits en foresterie aussi bien qu'en agriculture.)

La première conférence nord-américaine sur les mycorhizes à Urbana

À cette époque, les scientifiques se faisaient souvent dire, au retour d'une conférence, qu'ils avaient voyagé aux frais de Sa Majesté. Pourtant ces rencontres avec d'autres chercheurs, surtout à une époque où Internet n'existait pas, sont essentielles pour l'évolution des perceptions, des idées et des connaissances pour les participants. Au cours de ma carrière, j'ai participé à des dizaines de conférences de par le monde, grâce aux fonds de recherche obtenus des gouvernements locaux et d'autres agences internationales. J'ai pour ma part organisé plusieurs conférences locales et surtout deux conférences internationales sur les mycorhizes, en 1983 à Québec et en 2003 à Montréal, dont on reparlera plus loin. Au total, ce sont plus de 1 200 personnes d'une trentaine de pays qui ont participé à ces événements. J'estime que ces visiteurs ont à leur tour versé quelque 500 000 \$ dans l'économie locale.

Bien que l'intérêt fondamental des symbioses mycorhiziennes et de leur potentiel d'application en foresterie et en agriculture ait été démontré, très peu de chercheurs ont poursuivi des travaux significatifs dans les années 1960. La rencontre de la première NACOM à Urbana en 1969 témoigne de cet état de choses. Avec les participations de quatre Européens, deux Canadiens et sept-huit Américains, on peut pratiquement dire que ce fut la première conférence internationale sur le sujet. Bien sûr, il y avait aussi plusieurs curieux n'ayant jamais travaillé sur les mycorhizes, ni avant

ni après cette rencontre. On peut dire que ce fut le coup d'envoi de la recherche fondamentale et appliquée sur les mycorhizes en foresterie et en agriculture. Des figures de proue présentes à cet événement constitueront les pionniers assurant l'émergence de ce champ de recherche prometteur. Il faut noter, Harley, Lewis, Mosse, Harper et Read en Angleterre, Gerdeman, Trappe et Marx aux États-Unis ainsi que moi-même au Canada. Sur les aspects pratiques, on note déjà une préoccupation pour la mise au point de méthodes de multiplication massive des inoculum arbusculaires.

C'était une conférence sur invitation et c'est grâce au lecteur externe de ma thèse, John Palmer, que j'ai reçu une telle invitation. En revoyant le programme de la conférence, j'ai pu constater que les grands thèmes développés jusqu'à nos jours étaient déjà abordés, bien que de façon rudimentaire. On y parlait de production d'inoculum, de synthèse des ectomycorhizes et de l'inoculation des plants, ainsi que du rôle de la lumière et de l'influence sur la nutrition minérale. La protection contre les agents pathogènes incluant les nématodes y a soulevé beaucoup d'intérêt.

Mais ce qui m'a le plus marqué et attiré mon intérêt, c'est l'importance et le potentiel énorme des mycorhizes arbusculaires. J'y ai vu pour la première fois sous la loupe binoculaire et le microscope, les spores géantes des champignons impliqués et leurs structures intra et extra racinaires. Je me souviens d'avoir vu dans ma tête, pendant le retour en avion, comme des feux d'artifice signalant l'aspect grandiose de cette symbiose, sa portée, sa signification et son potentiel en foresterie et surtout en agriculture. La symbiose mycorhizienne arbusculaire m'est alors apparue plus répandue et plus universelle dans le monde végétal de la planète que les ectomycorhizes réservées aux plantes ligneuses. Ceci devait imprimer un tournant important dans mes plans de recherche et dans l'orientation donnée à plusieurs de

mes étudiants gradués. Les conséquences de cette nouvelle perception se sont étalées tout au long de ma carrière et les mycorhizes arbusculaires font plus que jamais partie de mes préoccupations quotidiennes.

À partir de ce moment, il devenait impératif pour moi de considérer la symbiose mycorhizienne dans sa plénitude et de troquer le microscope contre le macroscopie comme me l'avait recommandé mon mentor, Marcel Lortie, passant ainsi de la physiologie à l'écologie.

Chapitre 5

LES ANNÉES 1970, PREMIÈRES RÉALISATIONS

Les étudiants aux études supérieures

Les étudiants aux études avancées n'ont été pour moi rien d'autre que des maîtres. Sans eux, le cheminement de mes idées aurait été minimisé et réductionniste. Avec tous ces jeunes enthousiastes autour de moi, j'ai pu consacrer mes énergies à développer des idées, à leur indiquer des pistes de recherche, à les inciter et les aider à publier leurs résultats et à finaliser leurs propres thèses.

J'ai eu le privilège de diriger comme premier étudiant un candidat de grande qualité, excellent au laboratoire et qui cherchait à dépasser le maître. On ne peut pas demander mieux. C'est ainsi que Claude Richard, jeune diplômé en foresterie, a choisi de préparer son mémoire de maîtrise sous ma direction. Nous avons alors décidé de travailler sur les mycorhizes de l'épinette noire, en isolant en culture ses champignons associés et en effectuant la synthèse aseptique *in vitro* de ses mycorhizes. Il faut dire que mes subventions du CRSNG m'avaient permis l'achat des premiers cabinets de croissance jamais fabriqués au Canada, avec contrôle de l'éclairage, de la température et de la photopériode. Il s'agissait d'une technologie innovatrice pour l'époque, laquelle me restera utile jusqu'à récemment. Après avoir complété son mémoire de maîtrise, Claude est allé faire un stage en France chez le professeur Boulard. À son retour,

redoublant d'enthousiasme, il s'est inscrit au Ph. D., toujours sous ma direction. Il était intéressé par la phytopathologie et nous avons donc travaillé sur le contrôle d'un champignon que j'appelle aujourd'hui nécrorhizophage. Claude l'avait identifié comme le *Phialocephala dimorphospora*, mais l'équipe du professeur Wilcox de l'Université Cornell en a fait une nouvelle espèce sous le nom de *Phialocephala fortinii*. J'espère que Claude ne m'en veut pas.

Il s'agit d'un champignon vivant à proximité des racines des arbres, toujours prêt à se nourrir de jeunes racines mourantes ou en difficulté. En présence de ce champignon, en conditions aseptiques, les racines de l'épinette noire se voient envahies, la croissance du plant diminue montrant une forte chlorose. Lorsque l'on effectue la même expérience en s'assurant de la présence d'un champignon ectomycorhizien, les symptômes observés disparaissent presque complètement. Sachant que ces champignons nécrorhizophages sont omniprésents dans la mycorrhizosphère de nombreuses plantes, ceci a mis en lumière le rôle protecteur des ectomycorhizes dans la protection de ces envahisseurs néfastes. C'est à partir de cette base que Claude a poursuivi une belle carrière comme phytopathologiste en agriculture. Pour ma part, j'ai retenu que la symbiose mycorhizienne a comme fonction non seulement d'absorber les nutriments, mais également de protéger les plantes contre les envahisseurs.

Toujours au début des années 1970, un deuxième candidat, Maurice Lalonde, a frappé à ma porte. Il devait ouvrir un nouveau champ de recherche dans mon laboratoire, avec l'étude de la symbiose actinorhizienne des aulnes. Après avoir complété son mémoire de maîtrise, cet étudiant des plus imaginatifs a complété sa thèse de Ph. D. au Mc Donald College, avec un professeur actif sur les symbioses fixatrices d'azote. Après un postdoctorat aux États-Unis, Maurice fut accueilli comme professeur dans notre département. En plus

de ses excellents travaux sur la symbiose actinorhizienne, incluant des descriptions inédites de ses ultrastructures, il fut celui qui développa hâtivement dans notre faculté, l'approche de la biologie moléculaire avec ses étudiants.

Un autre étudiant, Valentin Furlan, venu cette fois du Département de biologie de l'Université de Montréal, s'est présenté à mon bureau. Ce qui caractérisait ce candidat, c'était son travail des plus assidus et des plus méthodiques. Il a laissé des traces d'une très grande utilité toujours valables encore aujourd'hui. Depuis la conférence de 1969 à Urbana, j'avais toujours rêvé d'entreprendre des recherches sur ces fameuses mycorhizes arbusculaires. Je lui ai donc proposé de faire sa thèse sur ce thème. Après avoir appris à extraire du sol les spores de ces champignons, nous avons effectué des essais en cabinets de croissance sur l'écophysiologie de cette symbiose racinaire, en utilisant l'oignon comme plante modèle. Nous avons ainsi décrit l'influence de la température, de la lumière et de l'apport en nutriments sur la croissance de la plante hôte et sur la multiplication des spores de ces champignons. Les connaissances théoriques générées par ce travail sont toujours d'utilité et encore citées dans la littérature. Mais, surtout, les connaissances et la méthodologie acquises au cours de cette première recherche sur les mycorhizes arbusculaires devaient, des années plus tard, ouvrir la porte à de nombreux travaux impliquant la propagation aseptique des inoculums et les aspects pratiques de cette symbiose en agriculture. Dans les travaux confiés à Valentin, à titre d'assistant de recherche et en compagnie de Christian Plenchette, nouvel étudiant au Ph. D., nous avons isolé un champignon arbusculaire en provenance de racines de frêne récoltées sur le site de la pépinière Hamel à Pont-Rouge. Cette espèce produit en plus des spores extra racinaires une grande quantité de spores intraracinaires, identifiée à ce moment au *Glomus intraradices*. Bien que le

nom ait changé aujourd'hui, c'est toujours le même isolat et de la même espèce qui a servi pour établir le premier génome d'un champignon arbusculaire au monde, et c'est toujours cet isolat qui est multiplié par millions de spores, chez Premier Tech et devenu célèbre partout au monde sous le vocable de DAOM 197198, maintenu dans la banque de souche du ministère canadien de l'Agriculture. Il semble bien qu'un bon nombre de productions industrielles actuelles du monde fassent appel à cet isolat.

Travaux de restauration des sites affectés Manic 5 et La Grande

Manic 5

Au début des années 1960, la nationalisation de l'électricité fut réalisée. En 1972, la construction du barrage de Manic V fut complétée. Cet ouvrage d'ingénierie, sans pareil à l'époque, constitue encore aujourd'hui un symbole de l'émancipation des Québécois. Bien que des entreprises canadiennes et américaines aient participé à la conception, la construction a été réalisée en grande partie pour la première fois par des entreprises québécoises.

J'ai eu l'occasion de visiter Manic dès 1971, alors que cet ouvrage magistral était en fin de construction. Les photos prises à cette époque montrent non seulement le barrage, mais aussi l'immense surface en aval ayant été dégradée par ces travaux. Sur une centaine d'hectares, on observait une surface totalement dénudée de toute végétation et on avait recouvert ce site, souvent en pente, d'une épaisse couche de roches pour prévenir d'éventuels glissements de terrain. Sauf dans les parties les plus basses, le paysage rappelait la surface lunaire.

J'étais loin de m'imaginer que deux ans plus tard on me demanderait de développer une approche pour y réinstaller la végétation.

Au cours de l'hiver 1972-73, j'avais pris connaissance des travaux de Reiners et Lawrence publiés en 1971, décrivant le retour spontané de la végétation sur le recul des glaces à Glacier Bay, en Alaska. À mesure que ce glacier reculait, on voyait s'installer une succession primaire sur la moraine de fond, un substrat aussi lunaire que celui de Manic 5.

Dans le processus de retour spontané de la végétation, on voit d'abord apparaître des dryades, arbustes prostrés en surface du substrat portant des nodules fixateurs d'azote à l'aide de leur symbiote de type *frankia*. Cette plante laisse un peu de matière organique et commence à générer un sol rudimentaire. Par après, ce sont des aulnes qui prennent le dessus, toujours à l'aide des *frankia* fixateurs d'azote. La biomasse générée en quelque 15-20 ans apporte au sol une quantité beaucoup plus importante de matière organique, de sorte que l'on voit se former sur la surface un humus fertile. Après une vingtaine d'années, cet humus sera prêt à recevoir des semences de peupliers, particulièrement faciles à emporter par le vent. Puis, s'établiront des épinettes de Sitka avant qu'elles ne cèdent la place à la pruche de l'Ouest, atteignant les 20 mètres de haut sur un sol complètement formé, montrant les strates typiques d'une forêt coniférienne.

Ces informations, produites par Reiners et Lawrence, arrivèrent au bon moment alors qu'Hydro Québec m'avait demandé, en 1973, de définir une méthodologie pour restaurer la végétation sur le site de Manic 5. Philippe Duguay, ingénieur responsable des travaux de restauration sur ce site, m'a contacté pour l'assister dans ses travaux. C'est d'emblée que j'ai recommandé la plantation d'aulnes sur cette immense étendue de roches. Il s'agissait d'aulnes crispés et non d'aulnes rugueux venant en milieux humides. D'ailleurs, Philippe Duguay m'a mentionné que lors d'une visite au barrage de Bersimis, terminé quelques années auparavant, il avait vu ces aulnes pousser à travers les pierres. J'étais en

pleine confiance et ai recommandé de produire des milliers d'aulnes en récipients pour la plantation l'année suivante.

Lors de ma première visite sur le site, on m'a demandé que faire de la chaux qu'on avait fait livrer avec deux camions semi-remorques, comme recommandé par un horticulteur. J'ai alors répondu que ce serait inutile et que ça pourrait même nuire, selon le plan que j'avais en tête. Le lendemain matin, j'ai constaté qu'on était à enfouir cette chaux dans une grande fosse. On m'a également demandé que faire avec la liste des fertilisants et des semences qu'ils avaient également reçus de la même personne. Évidemment, ma réponse fut de dire que nous n'en aurons pas besoin.

Les aulnes furent plantés, non pas avec des pelles, mais en soulevant une pierre et en plaçant la racine du plant avant de la remettre la pierre à sa place.

Trois ans plus tard, ces arbustes recouvraient totalement les surfaces plantées avec 20 tonnes à l'hectare de matière sèche et une chute annuelle de feuilles de près de 2 tonnes de matière sèche, contenant 300 kilos d'azote.

Ce sera une histoire à suivre au cours des 40 années suivantes. La sère écologique de Glacier Bay sera-t-elle reproduite dans cette expérience grandeur nature?

La Grande

En 1976, il y eut grève des professeurs tout au long de l'automne à l'Université Laval. Que faire? Impossible d'entrer au laboratoire! Encore une fois, à quelque chose malheur est bon. Alain Soucy, collègue de l'Université Laval, venait d'être nommé à la direction de la section écologie de la Société d'énergie de la Baie-James (SEBJ). Ayant eu vent de mes travaux à Manic 5, il m'a invité à faire partie d'un groupe de travail sur la réhabilitation des sites affectés par les travaux gigantesques qui s'amorçaient dans cette région nordique.

C'est ainsi que j'ai participé activement, de façon plus ou moins continue, aux travaux de réfection de la végétation. Évidemment, la plantation d'aulnes a été retenue dès le départ, mais de nombreuses techniques horticoles et sylvicoles sont venues s'ajouter.

Pour ce qui est des aulnes, ils étaient encore jeunes, mais déjà bien implantés au moment de l'inauguration du barrage LG2 par Robert Bourassa, en 1979. Ayant revisité le site de Manic 5, cinq ans après les premières plantations d'aulnes, on pouvait observer une dense végétation sous leur couvert et surtout un envahissement généralisé des sites avoisinants par de jeunes aulnes venus spontanément, à partir de semences produites par nos plants initiaux. C'est ce qui m'a fait dire à Laurent Hamel, ingénieur en chef du projet de la Baie-James, que les aulnes allaient un jour envahir la totalité des ouvrages en enrochement sur l'ensemble du territoire. Il m'a affirmé que c'était impossible, compte tenu de cet enrochement sur plusieurs mètres d'épaisseur recouvrant ces sites. Qu'en sera-t-il 35 ans plus tard? C'est encore une histoire à suivre.

La coopération internationale

Au cours de cette fameuse grève de l'automne 1976 à l'Université Laval, j'ai eu l'occasion de contacter Gilles Lessard, un forestier représentant du Centre de recherche en développement international (CRDI) pour l'Afrique, à Québec. Je me souviendrai toujours de ma première visite à Tunis, en compagnie de Gilles, dont le but était de mettre sur pied un projet de R et D visant à valoriser l'alfa des grandes plaines herbacées de la région de Kasserine, pour en faire du papier, la papeterie de Kasserine étant approvisionnée avec des fibres importées.

Au cours du même voyage, j'ai eu l'occasion de me rendre à Kano dans le nord du Nigéria, pour un projet de reboisement destiné à empêcher la progression du désert.

Ces deux projets n'ont pas connu beaucoup de succès, celui du Nigéria resté sans suite, mais j'ai connu l'Afrique pour une première fois et ce ne sera pas la dernière.

État des connaissances sur les mycorhizes à la fin des années 1970

On se souviendra que la première rencontre de chercheurs sur les mycorhizes a eu lieu à Urbana, en Illinois, en 1967 et qu'on y trouvait un petit nombre de scientifiques convaincus de l'avenir de ce champ de connaissance, et à laquelle j'ai eu le plaisir d'assister. On aurait pu s'attendre à un développement accéléré des recherches dans ce domaine au cours des années subséquentes. Ce fut pourtant un lent départ et à la fin des années 1970, on comptait une vingtaine de chercheurs et une centaine de publications significatives. L'essentiel de ces travaux est venu d'Angleterre et des États-Unis. Au Canada, je demeurais le seul scientifique actif dans ce domaine avec Larry Peterson de l'Université de Guelph. Après mon passage lors d'un sabbatique à Lyon en 1976, la recherche a connu un départ significatif en France. Mes hôtes à l'Université de Lyon ont organisé une rencontre où j'ai pu exposer les travaux en cours à l'Université Laval. On me permettra de penser que ma contribution a été pour quelque chose dans le départ rapide subséquent de la recherche en France, dans ce domaine.

Sous l'élan de J.L. Harley en Angleterre, les recherches en physiologie au cours de cette période ont porté surtout sur le rôle des ectomycorhizes dans l'absorption du phosphore et sur le transfert des sucres vers les champignons. Les études anatomiques et histologiques ont retenu l'attention d'un bon nombre de chercheurs, avec l'aide de la microscopie.

pie électronique vers la fin des années 1970. Sous l'impulsion de Gerdemann et Trappe aux États-Unis, les premiers travaux sur la systématique des champignons mycorhiziens arbusculaires ont vu le jour. On connaissait à ce moment une vingtaine d'espèces. La méthode par tamisage humide des sols, développée par Gerdemann, a permis de récupérer les grosses spores (50 à 200 μ) de ces champignons aux couleurs et formes variées. En science, il arrive fréquemment qu'une nouvelle méthode, souvent très simple, ouvre un champ de recherche. Cette méthode est encore d'usage courant pour récupérer les spores et en établir la biodiversité, les structures cellulaires et l'abondance dans les sols. Encore aujourd'hui, elle est à la base de la découverte et de la description de nouvelles espèces partout dans le monde. Cette méthode est encore utile pour sélectionner des spores, pour multiplier l'espèce et produire des inoculums monosporaux destinés à des essais en laboratoire et aux champs.

Déjà, le défi de la culture axénique (c'est-à-dire en l'absence de tout autre microorganisme) était lancé. L'équipe de Mosse, Hepper et Sanders a donné une impulsion remarquable à la recherche sur le fonctionnement des mycorhizes arbusculaires. On note en particulier les premières synthèses de ces mycorhizes en conditions aseptiques sans toutefois obtenir la production de nouvelles spores, ce qui s'avèrera avec les années déterminant pour nos propres travaux sur la culture de ces champignons sur racines isolées, à la fin des années 1980, qui nous permettront alors d'obtenir pour la première fois des spores produites en aseptie.

La disponibilité des spores (inoculum) a également permis les premières expériences sur le terrain, se traduisant le plus souvent par des gains de croissance significatifs, pour ne pas dire spectaculaires, en particulier chez plusieurs plantes agricoles.

Diverses méthodes ont été également mises au point pour la culture des champignons ectomycorhiziens des arbres pour la synthèse des mycorhizes en conditions aseptiques ou non. On espérait toujours que les travaux sur les ectomycorhizes s'avèreraient utiles dans la production des plants forestiers et la récupération des spores de ces champignons. Marx, un autre pionnier cette fois américain, a découvert un champignon gastéromycète, le pisolithe (grosse vesse de loup) capable de pousser sur des déchets de charbon en Pennsylvanie. Il faut dire que sur un tel site, la température du substrat atteint les 35-37°C. Pourtant, des pins en semis arrivent à s'y installer. Une fois assez développés pour produire leur ombre, ils connaissent une croissance appréciable. Cette pisolithe produit des fructifications de fortes dimensions (10-15cm de diamètre) comportant une carapace épaisse et contenant des centaines de millions de spores. Cette source de spores abondantes permettait l'inoculation facile des plantules de conifères destinées au reboisement. Marx a appliqué cette inoculation toute simple, en particulier dans les plantations d'arbres en pays tropicaux, avec beaucoup de succès.

À la fin des années 1970 s'est ouvert un tout nouveau champ de recherche sur le rôle des ectomycorhizes dans la prévention des maladies des arbres. Jusqu'à ce moment, le seul mérite attribué aux mycorhizes, arbusculaires aussi bien qu'ectomycorhiziennes, concernait leur rôle dans l'absorption du phosphore et possiblement dans la résistance à la sécheresse. Encore là, Marx a ouvert un tout nouveau champ de R et D en démontrant le rôle omniprésent des ectomycorhizes dans le contrôle des maladies racinaires des arbres.

On a vu que Trappe a joué un rôle de pionnier, en jetant les bases de la systématique des champignons arbusculaires, mais il fut également le précurseur d'un champ de recherche maintenant en développement accéléré, celui de

la consommation des fructifications des champignons ectomycorhiziens par la faune. Pour la première fois, on menait une recherche d'envergure impliquant l'écologie des champignons ectomycorhiziens, en faisant le lien entre l'arbre fournissant de l'énergie (sucre) aux champignons, lesquels servent de nourriture à diverses espèces animales, surtout des rongeurs. Pour boucler le cycle, ces animaux mycophages assurent la dispersion des spores de ces champignons, comme ce fut le cas pour le retour de la végétation à la suite de l'éruption du mont Ste-Hélène.

Pendant ce temps, on observe également plusieurs travaux sur les truffes en France et en Italie, ainsi que sur les mycorhizes des orchidées. Enfin, la contribution remarquable de deux Canadiens mérite d'être soulignée. Pyrosynsky et Dalpé ont montré l'existence des structures anatomiques des mycorhizes arbusculaires dans des fossiles de *Rhynia*, toujours considérées comme les toutes premières plantes vasculaires à avoir supporté cette symbiose racinaire, il y a environ 400 millions d'années.

Chapitre 6

LES CHEMINS DE LA DÉCOUVERTE

Les années 1980 ont été pour nous, à Québec, une période si on peut dire explosive, et ce, dans plusieurs directions. Les activités de recherche se sont multipliées grâce à des subventions de plus en plus importantes et de sources diversifiées. Un grand nombre d'étudiants gradués sont venus rejoindre le groupe, plusieurs d'origine étrangère. La reconnaissance par les pairs internationaux s'est affirmée en nous confiant l'organisation, à l'Université Laval, d'une conférence nord-américaine ayant pris des proportions internationales et, évidemment, des distinctions honorifiques sont venues couronner le tout.

La culture sur Turface: une recherche appliquée aux conséquences majeures

Même si la recherche fondamentale a connu un développement continu dans notre laboratoire dès le début des années 1980, la préoccupation pour les applications a pris racine, avec l'utilisation de la montmorillonite calcinée (Turface). Cette innovation devait permettre une mise en évidence spectaculaire de l'effet des mycorhizes arbusculaires sur les plantes. Je dois remercier André Daoust, chercheur au Service canadien des forêts à l'époque, de nous avoir fait connaître ce substrat. Il s'agit d'un matériel totalement dépourvu de matière organique, se présentant sous forme de granules de 0,5 cm dont la consistance rappelle celle de fragments de pots à fleurs en argile. En irriguant ce substrat chimiquement inerte avec une solution nutritive comportant tous les

éléments minéraux dont la plante a besoin, nous avons cultivé des frênes en présence ou en absence de champignons mycorhiziens. Quelle ne fut pas notre surprise de voir les frênes cultivés dans ce matériel porteur de mycorhizes montrer une croissance remarquable? Mais la plus grande surprise fut de voir les plants témoins, sans inoculation mycorhizienne, ne faisant que quelques centimètres, comparativement aux plants porteurs de mycorhizes atteignant plus d'un mètre. Cette petite découverte nous a valu une reconnaissance un peu partout au pays (*Toronto Sun*, *Ottawa Citizen*, bulletin du Centre de recherche pour le développement international, et évidemment la presse locale). Ceci nous aura valu également la visite de la Gouverneure générale du Canada, l'Honorable Jeanne Sauvé, le recteur de l'époque Jean-Guy Paquet l'ayant dirigée vers notre laboratoire à l'occasion de sa visite à l'Université Laval.

Il faut savoir que, dans ce substrat, les éléments nutritifs, notamment le phosphore, sont emprisonnés dans la structure poreuse de l'argile à laquelle, contrairement aux racines, les fins mycéliums du champignon mycorhizien ont accès.

Cette méthodologie s'est répandue dans la communauté scientifique internationale et a été sans doute déterminante pour que nous soyons retenus pour organiser à Québec, la 5^e Conférence nord-américaine sur les mycorhizes en 1981. On verra comment cette innovation en a permis une autre en 2015, avec une découverte de l'année soulignée par le magazine *Québec Science*.

Une rencontre déterminante avec Bernard Bélanger

En plus de la publicité, cette technique nous a permis de produire en quantités importantes, des inoculum propres aux fins de nos diverses expériences. Ces inoculum de première génération permettront, en plus de nos expériences aux champs, d'envisager également la possibilité de produire

des inoculums industriels. Bernard Bélanger, un industriel visionnaire, devait être séduit par cette démonstration quelques années plus tard, pour en faire aujourd'hui un produit en voie de révolutionner les pratiques agricoles partout au monde. Peu de temps après notre rencontre, Bernard Bélanger a mis sur pied dans son entreprise un modeste laboratoire, dans un vieux chalet, et a embauché deux de nos récents diplômés. Assez rapidement, la méthode de production sur Turface a connu un transfert technologique, accompagnée de toutes les méthodologies courantes dans notre laboratoire. Comme on le verra plus loin, il faudra près de 30 ans de R et D chez Premier Tech, pour en arriver à des produits hautement rentables pour l'entreprise et pour l'économie canadienne.

Les étudiants aux études supérieures

Au cours de ces années 1980, j'ai dirigé un grand nombre d'étudiants gradués dont les thèmes de recherche sur divers aspects apparaissent aujourd'hui comme des bourgeons latéraux ayant fleuri dans des jardins différents. On me pardonnera sans doute d'insister sur l'apport des étudiants ayant le plus contribué à l'axe central de mon cheminement scientifique, celui des symbioses mycorhiziennes.

Yves Piché

À la fin des années 1970, Yves Piché avait déjà amorcé sa thèse de Ph. D., qu'il a déposée en 1982. J'ai constaté qu'Yves disposait de nombreuses qualités complémentaires aux miennes, ce qui reste toujours vrai 35 ans plus tard. C'est un as pour le travail de laboratoire, ayant par exemple fouillé le détail des structures anatomiques et cytologiques des ectomycorhizes. Nous avons développé ensemble une technique qui s'est avérée des plus utiles au cours des années, celle de la culture des ectomycorhizes en sachets de

croissances, inspirée par les travaux de Maurice Lalonde sur les actinorhizes fixatrices d'azote. Essentiellement, il s'agit de cultiver des plantules d'arbres dans des sacs types ZipLock, dans lesquels on insère un papier absorbant pour permettre au champignon de s'y agripper et que l'on mouille avec une solution nutritive. Rapidement, nous avons heureusement pu obtenir de tels sachets préstérilisés, d'un fournisseur industriel. Dans notre labo, nous avons utilisé ces sachets par milliers. Une autre grande qualité d'Yves est son sens inné de la gestion. Ces deux qualités et les atomes crochus que nous avons développés ensemble font que, de façon ininterrompue, nous avons collaboré étroitement et nous le faisons toujours. Cette collaboration nous mènera à jeter les bases incontournables de la culture axénique massive en laboratoire, rendant possible d'envisager la production industrielle des inoculums mycorrhiziens arbusculaires indispensable en agriculture.

Christian Plenchette

En 1980 se pointe au laboratoire un candidat d'origine française, Christian Plenchette. Tous les étudiants précédents avaient une formation soit en foresterie, soit en biologie. Voici que ce nouveau venu avait une formation en agronomie, ce qui avec le temps s'est avéré déterminant pour le développement du laboratoire et mon cheminement de biologiste. Encore une fois, le paradigme de Teilhard s'est appliqué. L'évolution des systèmes vivants présuppose d'abord une divergence, autrement dit une différenciation des éléments de départ. La convergence de ces éléments différents conduit à l'émergence de propriétés nouvelles. Je réalise aujourd'hui que le fait que Christian avait reçu une formation différente de la mienne en biologie a permis, par notre association, l'émergence de recherches et de découvertes qu'aucun de nous deux n'aurait pu réaliser seul.

Dans un premier temps, en utilisant le Turface, nous avons comparé les effets de diverses espèces de champignons arbusculaires sur la croissance du poireau. Nous avons alors constaté que le champignon le plus efficace était le *Glomus irregulare* que nous avons demandé à Yolande Dalpé d'enregistrer dans la banque du ministère canadien de l'Agriculture, sous le numéro DAOM 197198. Comme on l'a déjà dit, ce champignon était appelé à un grand avenir. Il est connu partout dans le monde et constitue encore le principal champignon produit à l'échelle industrielle chez Premier Tech. On se souvient que c'est également ce champignon qui a été utilisé pour décrire le premier génome d'un champignon arbusculaire.

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé la première expérience aux champs impliquant l'inoculation mycorhizienne sur des pommiers produits in vitro. Nous avons traité ces pommiers, soit avec l'ajout de l'inoculum mycorhizien ou soit avec un fertilisant phosphaté soluble, tout en conservant des témoins sans aucun ajout. Le résultat fut spectaculaire et nous avons pu en tirer des leçons qui tiennent encore aujourd'hui plus que jamais. Il s'agissait d'un sol naturel, non stérilisé. À la fin de l'expérience, les plants témoins faisaient à peine 10 cm de haut, les plants ayant reçu le superphosphate (100kg/ha de P) un peu plus que 20 cm, alors que les plants inoculés faisaient en moyenne 45 cm.

Il faut savoir que ce sol ne disposait que de 25 parties par million de phosphore soluble. Avec une telle concentration, le technicien de la coop aurait dit: «Impossible d'obtenir une croissance significative des plantes dans ce sol, il faudrait y ajouter 250 kg par hectare».

La principale leçon à retenir est que, même si les propagules des champignons arbusculaires sont omniprésentes dans les sols, le travail et même la jachère en diluent la

diversité et la concentration. Ainsi l'apport de propagules supplémentaires a permis une colonisation immédiate des plants par le champignon mycorhizien arbusculaire, dès leur mise en terre. Pour la première fois, il nous est arrivé de penser que cet isolat possédait des propriétés bien particulières. Ceci a permis aux plants inoculés de surpasser du simple au double la croissance des plants ayant reçu le fertilisant usuel en agriculture. Les plants témoins pour leur part, sans inoculation et sans fertilisant, n'ont donné qu'une piètre croissance, l'été étant terminé avant que les inoculums naturellement présents aient réussi à coloniser pleinement leur système racinaire. Ceci répond à l'objection généralement exprimée. À quoi bon inoculer si les mycorhizes sont partout? Pour nous, cette découverte nous a donné des ailes; nous avons obtenu la certitude que l'inoculation des cultures à grande échelle avait un avenir.

En effet, cette contribution ouvrait toute grande la porte sur l'inoculation industrielle des plantes agricoles. La thèse de Christian étant publiée en 1983, c'est cette même année, pour la première fois, que j'ai serré la main de Bernard Bélanger. On constate aujourd'hui que cette collaboration s'est faite sans interruption et est en voie de conduire à une révolution verte en agriculture. C'est une histoire que nous suivrons jusqu'à la fin de mon cheminement.

Charles-Gilles Langlois

L'utilisation des mycorhizes arbusculaires en agriculture avait trouvé sa voie. Cependant, il était temps pour un professeur en foresterie de tracer celle des ectomycorhizes dans ce champ d'activité. À point nommé, arrive au laboratoire Charles-Gilles Langlois, un forestier pure laine. Il était attiré par l'utilisation des isotopes radioactifs à laquelle notre labo venait d'avoir accès et sa recherche devait jeter une lumière nouvelle sur les relations physiologiques entre les

arbres forestiers et leurs champignons ectomycorhiens. L'hypothèse à la base de ce travail est provenue de mes observations année après année sur l'apparition massive des fructifications des champignons ectomycorhiziens dans la deuxième partie du mois d'août, surtout à la Baie-James. Pourquoi en est-il ainsi? Baisse des températures? Augmentation des précipitations? Oui, peut-être, mais nous allons mettre à jour un nouveau facteur déterminant, méconnu jusqu'à ce moment.

Nous avons donc développé l'hypothèse que l'absorption du phosphore, un processus requérant de l'énergie, varie quantitativement au cours de la saison de croissance. Tout au long d'une saison, nous avons récolté en forêt des mycorhizes de sapins, à intervalles d'une semaine, et nous avons mesuré la quantité de phosphate marqué P32, absorbée. À chaque récolte, nous avons également mesuré sur le terrain la croissance de la flèche terminale des arbres pour avoir un repère sur la progression de leur croissance. Ainsi, nous avons constaté que le pic d'absorption du P survenait à la mi-août alors que les bourgeons terminaux avaient cessé totalement leur croissance depuis la mi-juillet. L'interprétation des résultats nous a fait dire qu'au cours de la première partie de la saison, les sucres produits par la photosynthèse sont mobilisés pour la croissance des parties aériennes de l'arbre. Par après, les sucres n'étant plus mobilisés par ces parties aériennes rejoignent alors les racines en grandes quantités, stimulant le développement et le fonctionnement des mycorhizes. Avec le travail de Christian Godbout, cette observation servira de base, au tournant des années 1980-1990, pour obtenir dans des conditions contrôlées la fructification du *Laccaria bicolor* et, plus tard, du *Suillus neoalbidipes*, un bolet. Ceci constitue une piste pour la production en serres des fructifications de champignons ectomycorhiziens comestibles.

Michel Caron

Au milieu des années 1980, un autre agronome, Michel Caron, se présente à mon bureau, ayant un intérêt pour la phytopathologie. Le travail de Michel a porté sur la maîtrise du *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici* par l'inoculation avec le déjà fameux *Glomus irregulare*. Le résultat s'est avéré spectaculaire dans des expériences conduites sur Turface, cette argile cuite permettant de cultiver les plantes dans un substrat dépourvu de matière organique. Nous avons ainsi observé un contrôle virtuellement complet de la fusariose, débutant par une diminution très marquée des propagules du fusarium dans la mycorrhizosphère et une disparition des symptômes dans le cœur des tiges ainsi que de la flétrissure des feuilles. La fusariose de la tomate est une maladie très répandue. Le jardinier amateur l'observe facilement sur ses plants de tomates, surtout s'il les plante à la même place les années subséquentes. Il s'agit-là d'une découverte importante susceptible de réduire drastiquement l'utilisation des fongicides dans la culture de cette plante.

Pourtant, 35 ans plus tard, elle demeure méconnue ou sous-estimée en agriculture et en horticulture. Les réglementations gouvernementales en matière d'utilisation d'agents biologiques sont tout à fait pertinentes pour écarter la vente de produits inefficaces. Cependant, pour respecter ces normes d'homologation, un producteur d'inoculant mycorrhizien doit dépenser énormément d'argent pour obtenir son numéro d'enregistrement. Il y a des effets pervers de cette réglementation qui obligerait les entreprises à dépenser encore plus d'argent pour avoir le droit d'écrire sur l'emballage de leurs produits que leur champignon mycorrhizien diminue et même prévient significativement telle ou telle maladie sur telle ou telle plante.

Ainsi, les phytopathologistes d'ici et d'ailleurs passent complètement à côté d'un outil efficace de contrôle biologique pour contrer un nombre croissant de maladies fongiques des végétaux. À l'ère de la lutte biologique, il est grand temps de se réveiller. Nous reviendrons sur cette question dans les années 2010, où on cherche toujours à diminuer sinon éliminer les biocides dans nos cultures.

Équipe sur la génétique des champignons ectomycorhiziens

Dans la deuxième moitié des années 1980, nous avons exploré intensivement la génétique des champignons ectomycorhiziens sous divers aspects. Plusieurs étudiants ont participé à cette activité. Il s'agissait de germer les spores de diverses espèces, en particulier le *Laccaria bicolor* et le *Pisolithus tinctorius*. La première espèce forme de petites fructifications et nous avons commencé à étudier le processus de sa mise à fruit. L'autre espèce avait été rendue célèbre par Marx un peu partout dans le monde.

Les spores des champignons sont dites haploïdes. Cela signifie qu'elles ne comportent qu'une copie des chromosomes, ce qui pour nous correspond aux spermatozoïdes ou aux ovules. Pour qu'un champignon puisse se reproduire, il faut que deux spores donnent des mycéliums ayant les chromosomes complémentaires pour produire un mycélium diploïde. Pour les humains, nous parlons d'un embryon. Il faut savoir qu'en combinant ainsi 10 spores différentes entre elles, on génère 90 individus génétiquement différents. Un des résultats intéressants de ces croisements, c'est d'avoir permis la sélection d'un hybride très performant du *Laccaria bicolor*, un champignon ubiquiste et polyvalent. Nous avons pendant cette période effectué des inoculations contrôlées sur quelques milliers de plants de pin gris et d'épinette noire, tout en conservant des plants témoins non inoculés. Une

abondante production de mycorhizes sur des plants vigoureux nous avait encouragés à promouvoir l'inoculation mycorhizienne en pépinières forestières. Ayant repris les mêmes essais l'année suivante dans les mêmes installations, il s'est avéré que tous les plants témoins ont formé d'abondantes mycorhizes. Dans les tunnels et l'équipement neuf utilisé la première année, la présence de spores des champignons ectomycorhiziens était virtuellement nulle, conduisant à des plants témoins dépourvus de mycorhizes. Cependant, à la fin de la saison, les plants inoculés ont produit une abondance de spores, lesquelles au cours de la deuxième année ont envahi les plants témoins. Ce fut une grande déception et la vision de voir un jour l'inoculation mycorhizienne se généraliser dans les productions de plants forestiers de la province s'est éteinte. On verra cependant qu'une découverte de Mohamed Lamhamedi, en 2018, au ministère responsable des forêts, remettra cette question dans l'actualité.

Pour ce qui est du *Pisolithus tinctorius*, les croisements amorcés par le doctorant Harry Kope ont permis de développer des hybrides capables d'empêcher le développement de maladies sur les plants. Lamhamedi et Wong ont pour leur part réussi à sélectionner des races capables de conférer aux plants une grande résistance à la sécheresse, cette résistance étant reliée à la morphologie et la cytologie du mycélium extra racinaire.

Dans son travail de doctorat, Monique Gardes a eu l'opportunité d'utiliser les hybrides du *Laccaria bicolor* dans un travail effectué chez Tom Bruns, en Californie, réalisant les premières amplifications PCR de l'ADN d'un champignon ectomycozien.

Ces travaux sur l'hybridation des champignons ectomycorhiziens ont permis de comprendre divers aspects fondamentaux de leur génétique, mais ce fut encore une fois

une grande déception que ces travaux ne puissent donner suite à des applications à grande échelle en foresterie, sauf pour la résistance à la sécheresse observée par Mohamed Lamhamedi. En recherche, on ne peut pas toujours gagner. Ce sera une tout autre histoire avec les champignons arbusculaires en agriculture.

Damase Khasa

Lors de mes déplacements en Afrique avec le CRDI, à la fin des années 1970, j'ai eu l'occasion de connaître un jeune biologiste zaïrois du nom de Khasa Phambu. Le pays a changé de nom depuis pour devenir la République démocratique du Congo et mon étudiant aussi! Il est redevenu Damase Khasa. Nous avons, dans ce cadre, mené une expérience d'inoculation en plein sol sur le campus de l'Université de Kinshasa. Des champignons venus du Québec, notamment le fameux *Glomus irregulare* de Pont-Rouge, se sont avérés capables de coloniser différentes plantes horticoles sous les tropiques, avec une stimulation de croissance significative.

Ceci m'a démontré pour la première fois qu'il n'est pas absolument nécessaire d'utiliser des champignons dits indigènes pour obtenir des résultats. Si je mentionne cet étudiant ayant fait par après son Ph. D. en génétique des arbres, c'est que la confiance que j'ai eue en lui qui lui a peut être permis, avec les années, de devenir une autorité en matière d'utilisation des mycorhizes pour restaurer la végétation sur les sites miniers, y inclus les sables bitumineux, sans compter le rôle peu ordinaire qu'il joue aujourd'hui en foresterie internationale, en particulier dans la formation des maîtres en foresterie et en techniques forestières dans de nombreux pays d'Afrique. Cette «semence» faite en Afrique avec le soutien du CRDI rapporte aujourd'hui au centuple.

Sylvie Dumas

À la fin des années 1980, je me suis impliqué dans une aventure sous le nom de LAFERSOL (Laboratoire sur les fermentations solides) dont l'objectif était d'utiliser des résidus forestiers pour produire des champignons comestibles. Je dois dire que mes collègues de la Faculté d'agriculture, ayant considéré que je marchais dans leurs plates-bandes m'ont fait la vie dure, forçant pratiquement la fermeture de ce labo. Tout de même, dans le cadre de ce programme, j'ai confié à Sylvie Dumas, étudiante M. Sc., un projet sur le comportement des champignons en présence de diverses concentrations de CO₂, en utilisant le shiitaké. Dans la recherche de Sylvie, nous avons démontré que le shiitaké est incapable de croître en absence totale de CO₂ et que plus on ajoute de CO₂, plus le champignon se développe, bien au-delà de la concentration atmosphérique (300 ppm à l'époque) allant jusqu'à 2500 ppm. Dans cette foulée, Lynn Moore, une Hollandaise ayant travaillé comme assistante de recherche, de retour en Hollande, a participé à la démonstration du rôle essentiel du CO₂ pour réussir la culture aseptique du mycélium de la chanterelle. On verra que cette recherche débouchera sur un nouveau paradigme fondamental et universel sur la biologie des champignons de la planète, incluant les symbiotes racinaires et dont je ferai état dans le texte des années 2015. Aussi, cette découverte aidera la réussite de la production des fructifications de champignons ectomycorhiziens d'intérêt gastronomique.

Guillaume Bécard

La venue dans l'équipe de Guillaume Bécard, un jeune biologiste français, devait conduire à la découverte la plus importante de ma carrière. Durant mes études de M. Sc. au Wisconsin, j'avais réalisé, on s'en souvient, la synthèse d'ectomycorhizes sur racines de pins excisées, en absence de la

partie aérienne de la plantule, sous des conditions aseptiques. À l'arrivée de Guillaume, la célèbre Barbara Mosse, de Rothamsted, venait d'obtenir des mycorhizes arbusculaires sur cultures de racines, sans jamais cependant obtenir de spores. J'ai donc aiguillé Guillaume sur cette piste en m'inspirant de mes travaux de M. Sc. en 1961-1962 sur la formation d'ectomycorhizes utilisant la culture d'organes racinaires isolés. Pour obtenir des mycorhizes arbusculaires, nous avons utilisé des cultures de racines de carotte génétiquement modifiées avec l'*Agrobacterium rhizogenes*. Cette modification permet d'obtenir une croissance racinaire prolifique et soutenue. C'est ainsi que Guillaume a obtenu non seulement la formation de mycorhizes arbusculaires sur racines de carotte, mais également quelques spores. Il faut dire qu'il s'agissait d'un champignon arbusculaire à très grosses spores, le *Gigaspora rosea*.

Dans la foulée de ces travaux, Guillaume Bécard et Yves Piché ont démontré que le CO₂ est essentiel pour le développement du tube germinatif des champignons arbusculaires, ce qui confirme une troisième fois, après les démonstrations de Sylvie Dumas et de Lynn Moore, le rôle du CO₂ dans la biologie des champignons.

On verra comment Yves Piché et son étudiante Sylvie Chabot ont également pris le relais à la suite de mon départ à Montréal en 1990. Ce sont eux qui ont réalisé la culture, non pas d'un *Gigaspora*, mais bien du fameux isolat Pont-Rouge du *Rhizophagus irregularis*, selon son nouveau nom. Ceci a donné naissance à la production aseptique des spores à grande échelle, base initiale de l'actuelle production industrielle de Premier Tech avec des milliards de spores, de ce fameux isolat de Pont-Rouge, DAOM 197198.

Il ne faut pas oublier la contribution de Marc St-Arnaud sur la culture de deux compartiments qui a ouvert la possibilité de produire aseptiquement de dizaines de milliers de spores.

Christian Godbout

Au cours des années 1970 et 1980, j'ai eu l'occasion à de nombreuses reprises de séjourner sur le territoire de la Baie-James, à différentes périodes de l'année. Ayant toujours des yeux attentifs pour observer les champignons, j'ai constaté dans cette région nordique où la longueur des jours diminue très rapidement à l'automne, que les fructifications de la grande majorité des espèces ectomycorhiziennes des arbres se développaient de façon explosive à compter de la mi-août, le long de la Grande Rivière. Les résultats obtenus par Charles-Gilles sur la translocation automnale des sucres ont vite allumé une lumière. Ainsi, j'ai proposé à Christian Godbout, un forestier, de faire une recherche sur l'effet de la photopériode en cabinets de croissance sur la fructification du *Laccaria bicolor*. L'idée était simple, il s'agissait de faire pousser pendant 12 semaines des plantules de pins inoculées avec le *Laccaria bicolor* sous des expositions lumineuses diurnes de longue durée (18 h). On pouvait ainsi simuler la saison estivale pendant laquelle les produits de la photosynthèse sont utilisés, surtout par les parties aériennes des plantules. Par la suite, nous avons simulé l'arrivée de l'automne en réduisant la photopériode pour obtenir des jours courts (9 h). La première observation a montré que rapidement les bourgeons ont arrêté leur croissance en formant un bourgeon préparatoire pour le printemps suivant.

Ceci devait rediriger les produits de la photosynthèse vers les racines où les champignons mycorhiziens sont les premiers preneurs. En moins de dix jours de ce nouveau régime, nous avons observé l'apparition de nombreux primordiums du *Laccaria bicolor* dont un seul s'est développé pour produire une fructification de grande taille, aussi haute que les plants de pins porteurs de ces mycorhizes.

Si on enlève la fructification avant qu'elle n'arrive à maturité (production de spores), immédiatement un des autres primordiums prend le relais et atteint également la maturité en peu de temps, et ainsi de suite. En retournant sous une longue photopériode, sans excès d'azote ou de traitement au froid (simulant l'hiver) pendant six mois, nous avons obtenu des poids secs de champignons trois fois supérieurs aux poids secs des plantules. Ces plantules ont été artificiellement transformées en « usines » de production de champignons. Il s'agit là d'une des grandes découvertes de ma carrière. Plus tard, dans les années 2000, j'ai pu également obtenir les fructifications du bolet à pied blanc, le *Suillus neoalbidipes*.

Ces résultats démontrent la possibilité de produire en serres, sous photopériodes contrôlées (comme pour la culture des chrysanthèmes ou des poinsettias), les fructifications de champignons ectomycorhiziens à valeur gastronomique. Bien que cette découverte ait été faite il y a près de 30 ans, je n'ai encore rencontré aucune entreprise désireuse de poursuivre la R et D sur ce sujet, pour faire de ce rêve une réalité, comme ce fut le cas avec Bernard Bélanger pour les mycorhizes arbusculaires. Mais on verra qu'on pourra y arriver vers 2020. Il faut avoir de la suite dans les idées!

DEUXIÈME PARTIE

Chapitre 7

LES ANNÉES 1990

Création du Centre de recherche en biologie forestière de l'Université Laval (CRBF)

En 1986 avant de quitter pour Montréal, j'avais fondé le CRBF, regroupant un petit nombre de professeurs et de chercheurs de Québec. Nous étions sept avec une quinzaine d'étudiants gradués, deux post-doctoraux et trois techniciens, bénéficiant d'une subvention Centre du Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FQRNT). Par ailleurs, l'Université du Québec avait fondé de son côté le Groupe de recherche en écologie forestière intégré (GREFI) à peu près les mêmes années. En 2006, une fusion de ces deux centres a donné naissance au Centre d'étude de la forêt (CEF). Ce fut une grande réussite.

Ce centre compte aujourd'hui 70 chercheurs universitaires, 47 chercheurs associés, 370 étudiants gradués et 15 post-doctoraux. Si la recherche forestière était en voie de structuration partout dans la province, je me suis donné la mission de regrouper les énergies en biologie végétale et c'est ainsi qu'en 1990, je suis allé poursuivre ma carrière à Montréal.

Directeur fondateur de l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV)

Les préliminaires

Au cours de mes premiers travaux à la Baie-James de 1976 à 1989, j'ai passé de bons moments sur le terrain avec Pierre

Bourque, un autre homme de vision sur mon passage. Comme il était directeur du Jardin botanique, impossible avec lui de ne pas parler de l'évolution de la biologie végétale au Québec. Je lui ai fait part de mes réflexions sur ce qu'était devenu l'Institut botanique de Marie-Victorin. Cet institut à mon avis n'avait pas évolué de manière à occuper l'ensemble du champ d'action dans ce domaine, étant centré sur l'herborisation, la systématique, l'anatomie et la morphologie. Nous avons discuté de ce que pourrait devenir ce champ d'enseignement et de recherche au Québec. Il m'a bien sûr questionné sur ce qui se passait à l'Université Laval. Je lui ai fait part de ma perception pessimiste, la discipline étant écartelée entre trois facultés, plutôt en compétition, et que je ne voyais pas l'Université Laval devenir un centre important de développement de cette discipline au Québec et encore moins au Canada.

Les années ont passé et nous sommes fréquemment revenus sur ce sujet, jusqu'au début de 1989 où il m'a invité à le rencontrer avec André Bouchard, du Département de biologie de l'Université de Montréal et responsable de l'Institut botanique. La chimie s'est très rapidement faite entre nous deux. Quelques mois plus tard, on m'invitait de nouveau, cette fois pour une rencontre avec le vice-recteur à l'enseignement et la recherche de l'Université de Montréal, M Lacroix. C'était parti, on m'a invité à occuper le poste de directeur fondateur et aussi tôt j'ai proposé le nom d'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV). J'ai ainsi accepté de déménager mes pénates à Montréal, sur le site du Jardin botanique. Mon bureau était celui jadis occupé par le frère Marie-Victorin.

L'implantation

Avant mon arrivée, le département de biologie avait commencé à recruter de nouveaux professeurs, en obéissant aux vents de l'époque soufflant vers la biotechnologie. J'ai rapidement

et péniblement constaté que ces nouveaux professeurs étaient très réductionnistes et tendaient à tout ramener à leur propre champ d'expertise. J'ai rencontré une fronde pénible.

Ma propre vision était qu'il fallait plutôt mettre sur pied une institution qui allait intégrer l'ensemble des disciplines de la biologie végétale, allant de la biologie moléculaire jusqu'à l'écologie des systèmes terrestres et favoriser la conduite de recherches interdisciplinaires. Cette vision heureusement partagée par mon nouveau collègue André Bouchard m'a encouragé à élaborer un plan de développement dans cette direction. Au cours de nos marches quotidiennes sur le merveilleux site du Jardin botanique, nous avons échafaudé ce que devait devenir l'IRBV. Le nouvel institut étant une création hybride entre l'Université de Montréal et le Jardin botanique de Montréal, Pierre Bourque a sérieusement participé aux discussions et soutenu le projet.

Les chercheurs de l'IRBV relevaient d'une part de l'université comme professeurs et d'autre part du Jardin botanique comme employés de la ville, dont peu de ces derniers détenaient un Ph. D. au départ. L'objectif était de les intégrer, en particulier dans des projets en équipes. C'étaient des scientifiques expérimentés et près des problématiques de terrain. Vingt-cinq ans plus tard, on verra que ces scientifiques auront évolué au point de devenir détenteurs de subventions majeures et de s'impliquer dans la direction d'étudiants gradués à titre de professeurs associés.

Le plan de développement

Le plan de développement déposé comportait trois axes soit : a) les aspects de niveau infra-organismique, b) les aspects de niveau organismique et c) les aspects supra-organismiques.

Les aspects infra-organismiques devaient regrouper la biologie moléculaire, la biologie cellulaire, et les bases de la génétique ainsi que la cytologie et l'histologie. Les aspects organismiques comprenaient la morphologie, la morphogénèse la systématique incluant la phylogénie et la physiologie. Les aspects supra-organismiques devaient inclure la biodiversité, l'écologie des espèces et la dynamique des écosystèmes.

La mise en place

Ce plan de développement accepté par le Conseil d'administration a été soumis au Fonds FQRNT, volet Centre de recherche. Le comité d'évaluation étant constitué de scientifiques réductionnistes, sans compter la fronde qui pesait contre moi et leur dénonciation devant le comité visiteur : le projet a été refusé. Heureusement, l'Université de Montréal (rectorat) ainsi que la Ville de Montréal (Jardin botanique) ont accepté de me faire confiance et de soutenir le jeune Institut avec leurs propres fonds.

Dans cette foulée, l'agrandissement du pavillon central a donné accès à des laboratoires et des serres modernes. Plus récemment, l'IRBV a développé un centre sur la biodiversité qui a doublé les installations. En voyant ce qu'est devenu aujourd'hui l'IRBV, je ne regrette pas les efforts déployés au départ et j'oublie les moments difficiles.

À mon arrivée à Montréal, l'IRBV comptait 17 personnes au total. À mon départ, en 1997, on comptait plus de 40 personnes et aujourd'hui on y regroupe près de 250 personnes, dont environ une centaine d'étudiants gradués et postdoctoraux. Plus de la moitié des personnes qui s'y trouvent viennent de l'extérieur du pays.

L'IRBV est devenu une institution d'envergure mondiale dans le domaine de la biologie végétale, se retrouvant

vraisemblablement parmi les cinq grands du genre sur la planète. Je dois avouer que j'en retire une grande fierté.

Les étudiants aux études supérieures

Bien que la direction de l'Institut nécessitait une bonne partie de mon temps, la recherche et l'enseignement ne se sont pas arrêtés pour autant.

L'équipe que j'avais quittée à Québec a été reprise en main de façon magistrale par mon collègue Yves Piché. Guillaume Bécard a complété sa thèse de Ph. D. mettant en lumière le rôle essentiel du CO₂ dans la croissance du tube germinatif et Sylvie Chabot devait compléter le travail de Guillaume Bécard en réalisant la culture aseptique sur racines isolées du fameux *Glomus irregulare* DAOM 197198. Sous ces conditions, ils ont obtenu une prolifération de spores beaucoup plus grande qu'avec le champignon utilisé au départ par Guillaume Bécard. Cette réalisation devait s'avérer déterminante pour l'étude et la production industrielle des champignons mycorhiziens arbusculaires.

Marc St-Arnaud

À l'IRBV, Marc St-Arnaud s'est inscrit au doctorat dès mon arrivée. Comme il était responsable de la phytopathologie pour la ville de Montréal à cette époque, je lui ai proposé d'étudier l'impact des mycorhizes sur une maladie de son choix. Il s'intéressait à la fusariose de l'œillet. Or, cette plante appartient aux caryophyllacées, une des rares familles à ne pas former de mycorhizes arbusculaires. Il a tout de même formulé l'hypothèse qu'une coculture avec des tagètes mycorhizées pourrait leur conférer une protection indirecte. Cette hypothèse s'est avérée juste; les œillets dont les racines côtoyaient celles des tagètes mycorhizées n'ont montré aucun signe de fusariose. Finalement l'examen microscopique des racines d'œillets a révélé la présence du mycélium

mycorhizien dans leurs cellules corticales, mais sans y former les arbuscules, une belle trouvaille! En dépit de nombreuses démonstrations partout dans le monde les phytopathologistes québécois demeurent septiques sur le rôle potentiel des champignons mycorhiziens arbusculaires en lutte biologique et dans la réduction des fongicides de synthèse.

Dans la foulée des travaux réalisés chez Yves Piché, j'ai proposé à Marc de cultiver le duo racine/champignon non pas dans une boîte de Pétri simple, mais dans une boîte à deux compartiments, pour simuler l'environnement de la plante, où poussent les racines, d'une part, en présence de sucre et, d'autre part, l'environnement sol où le mycélium se développerait en absence de sucre. Alors que dans le compartiment proximal (racine) peu de spores se sont formées, elles sont apparues par dizaines de milliers dans le compartiment distal occupé par le mycélium. Cette seconde trouvaille allait ouvrir encore une nouvelle fenêtre pour la recherche sur cette symbiose et démontrait la faisabilité de produire des inoculums à l'échelle industrielle. Encore une fois ce fut une réussite remarquable.

Xavier Villegas

Un autre étudiant est venu frapper à ma porte pour conduire des études doctorales, Xavier Villegas, originaire du Mexique. Je lui ai proposé d'étudier le rôle des bactéries et du *Glomus irregulare* dans la dissolution du phosphate tricalcique. Cette recherche a démontré clairement l'incapacité du champignon mycorhizien à solubiliser le phosphate tricalcique alors que des bactéries choisies au hasard le faisaient efficacement en association avec le mycélium du champignon arbusculaire. Ceci devait conduire à autre trouvaille, réalisée par Salma Taktek dans le cadre de ses études doctorales à l'Université Laval, devait conduire au titre de découverte de l'année 2015

du magazine *Québec Science*. Elle a démontré que les bactéries du genre *Burkholderia* forment des biofilms sur les mycéliums des champignons arbusculaires.

Collaboration avec Premier Tech

Très rapidement, au début des années 1990, l'entreprise Premier Tech a compris que l'avenir de cette filière passait par la production aseptique des inoculums sur cultures de racines. On a rapidement abandonné la production artisanale des inoculums en serre et mis sur pied un laboratoire pour développer un procédé industriel biotechnologique sous le sceau du secret industriel. Au début des années 2000, pour la première fois au monde, l'entreprise mettait à la disposition des jardiniers amateurs un produit efficace, mais on verra qu'il aura fallu encore une dizaine d'années avant d'offrir des produits accessibles à l'échelle des grandes cultures. Ce sont sans doute plusieurs dizaines de millions de dollars qui ont dû être investis avant que le retour commence à se faire sentir. Encore une fois, je salue la vision de Bernard Bélanger qui avait sans doute rencontré en cours de route, des réticences de la part de ses conseillers.

Nouveaux travaux à la Baie-James et à Manic-Outardes

Après une trêve de quelques années, Hydro-Québec a de nouveau fait appel à mes services pour suivre les résultats obtenus, à la suite des travaux conduits dans le cadre de la SEBJ, et définir de nouvelles approches pour reconstituer la végétation sur des sites difficiles, notamment ceux couverts de sable ou de graviers fins.

Nous avons pu observer que l'utilisation des aulnes s'est avérée très efficace pour amorcer le retour de la végétation, partout où ils ont été plantés sur des sols rocailleux comme ceux de Manic 5. Après 15-20 ans, on pouvait observer la présence de peupliers et de plusieurs espèces herbacées.

Cependant, sur les sols sablonneux, les aulnes ont connu une faible croissance sans donner de succession végétale significative. Sur le barrage de LG2, comme sur tous les ouvrages en enrochement tout au long de la Grande Rivière, on voyait de jeunes peupliers venir sous les aulnes. Quelques collègues ont décrié l'utilisation des aulnes, prétendant qu'ils ne permettaient pas la succession de la végétation attendue. Ils ont formulé cette conclusion simplement parce qu'ils se sont contentés de voir les situations sur sols sableux délavés, où c'est bien le cas. Mais s'ils avaient visité les sous-bois, en particulier de peupliers, ils auraient aperçu les vestiges des aulnes. Je n'ai malheureusement pas eu l'occasion de me rendre de nouveau sur le terrain pour tirer cette situation au clair.

Que pouvions-nous faire pour aider la végétation à s'installer sur les sols sablonneux? Trois types d'essais ont été faits: a) la transplantation de cylindres de sols prélevés sur les sites couverts de lichens dans la pinède grise, dans les sablières, b) l'inoculation mycorhizienne de trèfles sur des sites graveleux et c) l'utilisation de bois raméaux fragmentés (BRF) sur des sites récalcitrants aux aulnes. En termes plus simples, il s'agissait d'utiliser des branches d'essences feuillues déchiquetées comme apport de matière organique.

Pour la transplantation de cylindres de sol, j'ai fait fabriquer des tubes en acier inox munis d'un manche que l'on pouvait enfoncer à l'aide du pied, dans le sol de la pessière grise à lichens. Les cylindres de sol de 15 cm de diamètre sur 20 cm de profond ainsi prélevés ont ensuite été placés dans les sols sablonneux ou graveleux en utilisant le même emporte-pièce pour éviter la cavité avant d'y insérer un cylindre de sol portant la végétation. On y trouvait en plus des lichens, des mousses, de la potentille à trois dents, des bleuets. J'ai pu observer ces sites en 1998, cinq ans après l'implantation; il est clair que les lichens ont pris de l'expan-

sion, la potentille s'était fortement développée et on observait même des fruits sur les bleuets. Il y a près de 20 ans que je n'ai pas revisité ces sites. J'ai raison de croire que cette solution pourrait s'avérer fort utile et encore plus si on y semait une ou deux graines de pin gris.

Sur un site finement graveleux j'ai semé des graines de trèfle et les inoculées avec du rhizobium et des mycorhizes arbusculaires. Après trois ans, on comptait 35 inflorescences de trèfle au m², lesquelles ont produit des graines. Rien d'exubérant, mais ces plants ont réussi à aller chercher tous leurs nutriments essentiels à partir d'un gravier, sans ajouter aucun fertilisant, grâce au rhizobium pour l'azote et aux mycorhizes arbusculaires pour tous les autres nutriments.

Enfin, toujours à la Baie-James, j'ai utilisé des branches de saules, de peupliers, d'aulnes et de cerisiers de Pennsylvanie, fragmentées sur place avec un déchiqueteur. Ayant placé sur le sol sablonneux ou graveleux 1 ou 2 litres de ce mélange, j'y ai ajouté quelques grammes d'urée pour amorcer la décomposition de ces BRF. Puis, le terrain a été ensemencé avec des graines de pin gris ou d'épinette noire. J'ai pu observer dès l'année suivante une bonne germination et, au cours des années subséquentes, un certain développement des plants qui semblait plafonner. Par la suite, j'ai repris ces essais sur des surfaces d'un mètre carré où j'ai observé un accroissement avec un plafonnement survenant après plusieurs années.

Cette approche, mieux documentée et plus pratique à réaliser, m'a incité à poursuivre des essais sur des superficies beaucoup plus grandes. C'est ainsi qu'en 1996, sur le chemin menant à Outardes 4, j'ai fait recouvrir de BRF en continu une surface de l'ordre de l'hectare, sur 5 cm d'épaisseur, en ajoutant 20 g d'urée au m².

Près de 20 ans après, on observe une plantation extrêmement vigoureuse de pin gris, de mélèzes et d'épinettes blanches, sans aucun autre ajout que le petit coup de pouce de départ avec de l'azote.

Cette solution m'apparaît comme la plus efficace pour refaire la végétation forestière sur des sites dégradés par les grands travaux, y compris les sites d'exploitation minière.

Je me suis interrogé récemment à savoir quels sont les mécanismes intervenant dans ce succès. D'abord pour rester bio, on pourrait tout simplement remplacer l'urée par des granules de luzerne utilisés pour nourrir les lapins. Cette quantité d'azote n'explique cependant pas le développement d'arbres de 10-15 mètres de haut. Où puisent-ils l'azote? L'hypothèse la plus plausible serait que les champignons ectomycorhiziens seraient étroitement associés à des bactéries fixatrices libres de l'azote. Une hypothèse à vérifier!

Les BRF, selon toute vraisemblance, forment une matière organique que les mycorhizes peuvent utiliser au profit de l'arbre, notamment des acides aminés. Mais il y a plus, la présence des BRF conserve l'humidité du sol et empêche les excès de chaleur. Enfin, ce qui est moins connu, c'est que le CO₂ qui s'accumule stimulerait la croissance des champignons mycorhiziens. Tous les pédologues de cette planète ignorent que les sols contiennent 2,5% de CO₂, alors que l'air n'en contient que 0,4%. Les champignons ectomycorhiziens recyclent le C du CO₂ comme constituant d'acides aminés pour leurs parois cellulaires.

La retraite

Hé oui! toute bonne chose a une fin, mais ce fut cependant l'occasion d'un nouveau départ sur les chapeaux de roues. Je pense avoir laissé derrière moi un Institut en bonne santé et la suite des choses en est un peu la preuve, sachant que l'on y compte maintenant près de 250 personnes et une

activité débordante. Avant d’amorcer de nouvelles aventures scientifiques, j’ai pris un répit comme «gentleman-farmer». J’avais déjà acheté une petite ferme, à Donnacona, deux ans avant mon départ de Montréal et je me suis lancé dans la culture des fraises (7 tonnes par année) des framboises (1 tonne par année) et la production de sirop d’érable (450 litres par année). Ceci m’a initié aux exigences de l’agriculture et m’a amené à me préoccuper encore plus de l’utilisation des mycorhizes dans ce domaine. De plus, chaque fois que je faisais une visite à la Baie-James pendant cette période, je m’émerveillais de voir l’abondance et la diversité des champignons. Je me souviens d’avoir observé le fameux matsutaké, le jour de mon anniversaire en 1998, dans une forêt de pin gris à Laforge 2, sans doute la première observation au Québec!

La veille du retour projeté, j’en avais observé une grande quantité sur des terrains couverts de lichens. Pendant la nuit, il y eut une forte tempête de neige laissant un 20 cm d’accumulation. On m’avait dit que les champignons sauvages, pour les Inuits, constituent du «Cariboo food». En voyant ces champignons charnus effleurant à peine la couverture de lichens, il m’est venu à l’esprit que les caribous mangeraient des tonnes de champignons sauvages incluant le matsutaké. Qui plus est, cette couverture de neige permanente pourrait en assurer la conservation. J’ai eu confirmation de cette hypothèse en lisant un article dans la revue scandinave *Rangifer* où on mentionne que les rennes consomment de grandes quantités de champignons, à compter de la mi-août et ce qui est encore plus fascinant, c’est que cette consommation se poursuit pendant une bonne partie de l’hiver. Il me faudra plus de dix ans avant de convaincre les spécialistes québécois des cervidés que les chevreuils et les caribous consomment d’énormes quantités de champignons. Une thèse conduite sur l’île d’Anticosti a récemment confirmé cette hypothèse chez les cervidés.

La coopération internationale

Au début de ces années 1990, avec le CRDI, j'ai eu l'occasion de visiter l'Inde à plusieurs reprises et de découvrir ce pays étonnant. Ainsi, j'ai participé à plusieurs projets dont les retombées restent incertaines pour moi, sauf une rencontre parallèle avec Alok Adholeya de la grande entreprise Tata Energy, ayant fondé par la suite le Centre TERI biotechnology, à Delhi. Je lui ai parlé de notre méthode récemment développée en Pétri pour produire aseptiquement sur culture de racines, des propagules de champignons arbusculaires. Tout comme Bernard Bélanger, il a immédiatement compris l'importance de cette découverte et j'ai appris, quelques années plus tard, qu'il était parvenu à produire lui aussi, des inoculums arbusculaires à grande échelle.

Avec l'ACDI, cette fois, j'ai eu par la suite l'occasion de participer, avec la firme québécoise PAMPEV, à un projet pour mettre sur pied des pépinières forestières modernes en Tunisie. La base du projet consistait à produire les plants dans des récipients de plastique, avec des systèmes de fertigation (irrigation par buses avec fertilisants). L'originalité du projet consistait à fabriquer un substrat de culture par compostage des branches d'un arbuste, l'*Acacia cyanophylla*, un fixateur symbiotique de l'azote atmosphérique. Comme substrat témoin, on utilisait de la tourbe de mousse venant du Québec, dans lequel les ectomycorhizes se formaient spontanément sans doute à partir de spores véhiculées par la tourbe.

Très rapidement, on s'est aperçu que les plants de pin d'Alep cultivés dans le compost d'acacia ne formaient pas de mycorhizes et souffraient de chlorose. Il faut savoir que les sols de la Tunisie sont essentiellement calcaires, tout comme l'eau d'irrigation. Pourtant, le pin d'Alep arrive très bien à y pousser naturellement. Pour l'œil exercé, la

première hypothèse pouvant expliquer cette chlorose était l'insolubilité du fer en milieu calcaire (basique). On aurait pu utiliser du fer chélaté ou encore acidifier le milieu par irrigation pour rendre le fer disponible. Mais j'ai préféré l'hypothèse que l'inoculation ectomycorhizienne pourrait régler ce problème de façon plus élégante.

Ainsi nous sommes allés dans des sites couverts de pin d'Alep pour y découvrir des sporocarpes de *Rhizopogon*, un champignon formant ses spores par millions dans des fructifications ressemblant à des vesses-de-loup. Une semaine après avoir répandu ces spores par les systèmes de fertigation, la chlorose était en voie de disparition et après deux semaines les mycorhizes étaient apparues, les aiguilles des pins ayant pris leur couleur d'un vert intense.

Toujours avec l'ACDI et PAMPEV, j'ai participé à un projet comparable au Nicaragua quelques années plus tard.

1^{re} Conférence internationale sur les champignons comestibles

Toujours dans les années 1990, déjà impressionné par l'abondance et la diversité des champignons forestiers comestibles au Québec, j'ai appris que sur la côte du Pacifique, notamment en Colombie-Britannique, la récolte commerciale de ces champignons était devenue une pratique courante. En Oregon, aux États-Unis, mon bon ami Jim Trappe et son équipe ont publié des plaquettes (USDA Forest Service) parlant de la biologie et du potentiel commercial de ces champignons. Pourtant les Anglo-saxons étant plutôt mycophobes dans mon imaginaire, j'ai rapidement compris que cet engouement pour les champignons forestiers comestibles venait de l'arrivée massive de migrants asiatiques dans cette région. Issus de pays où la tradition de la consommation des champignons forestiers sauvages est une tradition centenaire sinon plus, ils ont été émerveillés à leur tour par cette abon-

dance de champignons forestiers comestibles. Ils en ont d'abord cueilli pour eux-mêmes, puis en ont expédié à leur famille. Très rapidement, une récolte industrielle s'est installée, tournée surtout vers l'exportation en direction de l'Asie.

En 1998, il m'est venu à l'esprit de susciter un événement pour sensibiliser les Québécois à cet énorme potentiel économique dormant dans les forêts du Québec. L'occasion m'en a été donnée par le ministère de l'Industrie, du Commerce, de la Science et de la Technologie. Ayant rencontré un représentant de ce ministère, on m'a encouragé à solliciter une subvention de 25 000 \$ pour organiser une conférence à l'échelle internationale sur la thématique: Les champignons forestiers comestibles. Par la suite ont contribué les ministères de l'Environnement et de la Faune et des Ressources naturelles, au provincial, et le Service canadien des forêts ainsi que le ministère des Affaires indiennes, au fédéral. Ces différents organismes ont assumé les frais de déplacement de conférenciers et la traduction simultanée. Quelle belle expérience! On verra au fil des années que cette petite subvention a été à la source d'une industrie en plein essor au Québec dans la récolte, le conditionnement et la mise en marché des champignons forestiers sauvages comestibles, sans oublier le mycotourisme.

Ainsi, nous avons regroupé près de 200 personnes venues du Canada et d'une dizaine d'autres pays, ayant présenté une vingtaine de conférences portant sur des récoltes commerciales aux États-Unis, dans l'Ouest canadien et en Europe. La présentation de Michel Courvoisier secrétaire de l'Association des champignons sylvestres en France a été particulièrement éloquente avec 5 800 tonnes récoltées en France annuellement et l'importation de 29 000 tonnes de chanterelles fraîches, dont 200 de la Colombie-Britannique, ainsi que 300 tonnes de cèpes. Sa présentation, encore d'actualité a fait état de l'ensemble du commerce international

des champignons sylvestres comestible. Les comptes rendus de cette conférence sont disponibles sur le site de Biopterre, un organisme de La Pocatière.

Je suis donc arrivé à la conclusion que la ressource est abondante au Québec et qu'il existe un important marché international pour cette ressource dormant dans nos forêts, se perdant par dizaines peut être centaines de milliers de tonnes chaque année. De toute évidence, il fallait tout simplement s'organiser pour cueillir ces champignons, les conditionner (séchage et autres) et les mettre en marché à l'échelle nationale et internationale. Jusqu'à ce moment, nous n'étions pas du tout organisés pour rejoindre ce marché international en plein essor.

Cet événement organisé conjointement avec mon vieux complice, Yves Piché, devait me rapprocher de l'Université Laval pour de nouvelles aventures scientifiques, et on verra que ceci se poursuit encore plus que jamais.

Les morilles de feu

Mon premier intérêt pour l'écologie des morilles de feu est né d'une observation sur le site du Service canadien des forêts à Petawawa, à la suite d'une expérience de brûlage contrôlé pour la régénération des peuplements de pins gris. Grâce à ma subvention du CRSNG et à l'aide modeste d'une industrie, j'ai appliqué un dispositif expérimental, arbre par arbre, avec différentes quantités de combustibles sur des surfaces de 4 m² autour de chaque tige. Ce fut un succès : presque tous les arbres traités ont produit des morilles coniques. J'ai pu observer pour la première fois, dans le profil de sol sous les fructifications, la présence de colonnes de sol constituées d'hyphes attachant ensemble les grains de sable de l'horizon éluvial de ce podzol, jusqu'aux horizons profonds à 10-15 cm sous la couche d'humus. À la base de ces colonnes, le mycélium étalé à l'horizontale portait une

grande abondance de microsclérotés (organes de réserve), déjà observés en culture par Lyne Gosselin dans le cadre de son mémoire de M.Sc. à l'Université Laval.

Et voilà l'imagination qui s'agite! Voici l'hypothèse qui en est résultée. Dans les forêts boréales, le mycélium des morilles de feu se développerait au cours de dizaines d'années dans les horizons profonds du sol, favorisé par le pH faiblement acide et se nourrissant de racines mourantes. Dans ces conditions et au cours des années, une grande quantité de microsclérotés, riches en réserves nutritives s'y accumulerait. L'arrivée du feu bouleverserait cette situation, d'abord par la production de cendres riches en potassium haussant le pH de l'ensemble du profil, de haut en bas. Le mycélium de morilles, incapable de se développer à des pH inférieurs à 5.5, se verrait favorisé et entraînerait la germination des microsclérotés. Qui plus est, la mortalité massive des racines causée par la destruction des parties aériennes par le feu fournirait une grande quantité de nourriture fraîche, au moment où le développement des fructifications en aurait grandement besoin. Je propose le néologisme rhizo-nécro-rhizophage pour qualifier ce comportement écophysiologique.

Pour tester cette hypothèse, nous avons produit un marqueur moléculaire, afin de vérifier dans différentes forêts de la forêt boréale si on y trouve effectivement le mycélium de la morille et ses sclérotés, dans les horizons profonds de leurs sols. Au moment d'écrire ces lignes, je n'ai pas encore eu l'occasion de confirmer cette hypothèse.

Chapitre 8

RETOUR À LA RECHERCHE ET À L'ENSEIGNEMENT

Rentier, mais non retraité

Avec le début des années 2000 et à la suite du colloque sur les champignons sylvestres de 1999, je suis reparti sur les chapeaux de roues, inconscient que j'étais à la retraite, mais jouissant tout de même d'une rente solide et fiable. Il s'agit-là encore d'un des nombreux privilèges liés à la carrière de professeur d'université. Les privilèges, ça se mérite et il n'y a pas d'empêchement à ce que l'on continue à compenser pour tous ces avantages par des activités bénévoles. Ce fut une période des plus active et diversifiée.

Les premières productions industrielles d'inoculum mycorhiziens

Avec le début des années 2000, après des investissements majeurs en argent et en travail acharné de jeunes scientifiques, Premier Tech a commencé à offrir aux jardiniers amateurs et aux horticulteurs les premiers inoculum aseptiques produits sur cultures de racines. Il aura fallu doubler d'énergie pour soutenir la mise en marché d'un produit inconnu du grand public. Les premières installations ne permettaient pas encore de produire à l'échelle des grandes cultures. Tout de même, ce produit distribué sous le nom de Myke, fleurs et jardins, a permis à l'entreprise de se faire la main, de commencer à faire connaître les mycorhizes auprès du grand public et de faire réfléchir les agriculteurs sur ce nouveau produit.

On se rappelle que, tout au long des années 2000, l'entreprise a multiplié les efforts, conçu et construit des laboratoires de plus en plus performants et a commencé à rencontrer les agriculteurs. Plus de 15 ans après ma première poignée de main avec Bernard Bélanger, son entreprise avait déjà investi des sommes considérables et avait surmonté les grandes difficultés techniques associées, propres au développement de tout produit innovateur. À la fin de ces années 2000, l'entreprise disposait enfin d'une usine pour satisfaire les demandes des agriculteurs pour l'inoculation de quelques dizaines de milliers d'hectares en grandes cultures. Tout de même, le produit n'était pas encore rentable et vivait toujours aux dépens des autres filières de l'entreprise et de quelques subventions gouvernementales. On sentait tout de même à ce moment que l'essor des inoculum mycorhiziens en grandes cultures était en marche.

In Vitro Culture of Mycorrhizas, un livre en 2005

Au cours des années 1990, comme on l'a vu, l'utilisation de la culture des champignons mycorhiziens arbusculaires sur explants racinaires a connu un intérêt remarquable dans la communauté scientifique internationale pour l'étude fondamentale de cette symbiose, avec une perspective potentielle pour la production éventuelle d'inoculum industriels à grande échelle. Fort de cet engouement, j'ai rédigé avec quelque collègues une revue synthèse dans le *Journal canadien de botanique* en 2002 faisant état des résultats acquis et des nombreux avantages que cette technique représentait pour les aspects systématiques, la conservation des souches, la morphogénèse de la mycorhize incluant la colonisation racinaire, le développement de la phase extraracinaire, les échanges physiologiques entre les symbiontes, la confrontation avec les organismes pathogènes et évidemment un regard sur la perspective de productions industrielles à grande échelle d'inoculum.

Devant l'intérêt de cette brève publication, en 2005, la maison Springer nous a demandé de produire un volume réunissant une impressionnante brochette de contributions par les chercheurs actifs dans ce domaine. Pour éditer ce volume qui a fait époque, j'étais associé à Stéphan Declerck (Belgique) et Désiré Strulu (France). Il s'agit de l'une de mes contributions les plus importantes à la littérature scientifique dans le domaine des mycorhizes. À voir les royautés que je reçois, je constate que ce livre est toujours en demande.

4th International Conference on Mycorrhizae à Montréal

Animée par nos publications, la communauté scientifique internationale ayant reconnu l'excellence des chercheurs québécois et canadiens dans le domaine des mycorhizes a accepté notre proposition de tenir à Montréal cette conférence prestigieuse. Le comité organisateur était constitué de Yolande Dalpé, Chantal Hamel, Marc St-Arnaud et moi-même, avec la participation de nombreux autres chercheurs canadiens sur les mycorhizes.

Cette conférence de 2003, à l'instar de celle tenue à Québec en 1981, a remporté un succès exceptionnel avec plus de 700 participants, en provenance de 22 pays. Les comptes rendus de cet événement ont été publiés dans la *Revue canadienne de botanique* en 2004, réunissant 18 textes, lesquels sont pour la plupart toujours d'actualité. Il est remarquable qu'à cette occasion la Société canadienne d'agronomie et la Société canadienne des sols, se sont jointes à l'ICOM4.

Dans le public, on considère souvent que les scientifiques ont le privilège d'être payés par des subventions gouvernementales, pour aller se promener un peu partout sur la planète, comme je l'ai déjà mentionné. Il faut comprendre que le jour où une conférence de cette envergure se tient chez nous, les retombées économiques sont considérables et

font plus que compenser nos propres dépenses à l'étranger, sans compter l'importance incontournable de ces rencontres entre scientifiques, ici comme ailleurs. Combien d'idées géniales recueillies dans ces occasions ont servi de bases à des découvertes ou à l'élaboration de méthodes plus efficaces. Comme disait Rabelais, il est important de frotter sa cervelle contre celle d'autrui.

Plusieurs collègues à l'étranger avaient tenté sans succès de mettre sur pied une Société internationale sur les mycorhizes. J'ai proposé au comité organisateur de la 4^e ICOM d'entreprendre des démarches pour mettre sur pied ce qui est devenu l'International Mycorrhiza Society. Cette société existe toujours et constitue le premier outil pour organiser les ICOM à travers le monde.

Les champignonnières du Québec

Avec le début des années 2000, mon intérêt pour les champignons forestiers comestibles a explosé. À la suite de la conférence internationale sur les champignons forestiers de 1999, il était évident que la ressource en champignons forestiers comestibles est extrêmement abondante au Québec, qu'un important marché international existait déjà et qu'il y avait un marché à développer ici même. La question était : comment s'organise-t-on ? Afin d'allumer cette flamme, à partir de la liste des participants québécois à la conférence internationale de 1999, entre 2000 et 2006, j'ai décidé de tenir des rencontres informelles pour réunir des personnes intéressées par cette filière, sous le nom de champignonnières. Chaque année, une vingtaine de personnes venaient échanger leurs idées et faisaient état de leurs récoltes et de leurs tentatives de mise en marché. Le plus dynamique parmi ceux-ci était Gérald Le Gal, propriétaire de l'entreprise Gourmet Sauvage, qui distribuait déjà différentes plantes telles que les crosses de fougères et autres et également des

champignons forestiers. Gérald a accepté la présidence du nouveau regroupement à former.

Une subvention majeure du CRSNG pour étudier les champignons forestiers comestibles

Le CRSNG est le principal organisme canadien attribuant des subventions aux chercheurs universitaires en sciences et en génie. Il y a bien sûr des subventions individuelles pour les chercheurs permettant la poursuite de travaux à long terme. Mais il y a aussi des subventions stratégiques ayant comme objectif des travaux de recherche et de développement susceptibles d'avoir des impacts significatifs sur la société canadienne, notamment sur l'économie. L'argumentaire que j'ai utilisé était que sur la côte du Pacifique il existait déjà une industrie florissante impliquant la récolte, le conditionnement et la mise en marché des champignons forestiers comestibles. On estimait à ce moment que la seule exportation vers l'Asie représentait 35 millions de dollars par année. En insistant sur la très grande abondance de ces champignons dans l'Est canadien, il nous faudrait suivre le modèle de la Colombie-Britannique.

L'objectif de la recherche consistait à examiner trois territoires, la Gaspésie, l'Abitibi et le nord du Lac-Saint-Jean, afin d'établir la diversité et l'abondance de la ressource. Nous avions en plus l'objectif de former du personnel hautement qualifié dans ce domaine au niveau de la maîtrise et du doctorat. Mon complice de toujours, Yves Piché, a soumis une demande de 380 000 \$ sur trois ans (2005-2008). Je me souviendrai toujours de l'appel téléphonique d'Yves pour m'annoncer l'attribution de la subvention: «Tu ne le croiras pas: ils nous ont accordé un montant de 380 000 \$ pour réaliser cette recherche!» Un véritable coup de pied au derrière pour nous propulser dans ce champ de recherche tout nouveau pour le Québec. Nous avons comme collabo-

rateurs, Damase Khasa de Laval, Luc Sirois de l'UQAR, Yves Bergeron de l'UQAT et Jean-Marc Moncalvo de Toronto. Nous avons formé trois personnes qualifiées, mais la situation au Québec étant encore dans son enfance, une seule de ces personnes a pu poursuivre des travaux par après, mais sans qu'elle puisse encore y trouver un travail permanent dans cette filière prometteuse pour l'économie du Québec. Pourtant, tout en gagnant sa vie autrement, Marie-France Gévry gardera longtemps et encore aujourd'hui une passion pour ce domaine. Comme c'est donc difficile de s'organiser! C'est le refrain que je vais vous servir encore au cours des 10 dernières années de mon récit.

Dans le cadre de ce projet, nous avons entre autres constaté la très grande abondance de ces champignons en Gaspésie, influencée par le climat marin et des forêts conifériennes omniprésentes bien arrosées. Pour ce qui est de l'Abitibi, le climat un peu plus continental entraîne une grande variation des abondances selon les années. Par contre, on y rencontre sur les eskers le fameux matsutaké que les Japonais payent à prix d'or. Qui plus est, nous avons constaté que notre matsutaké se rapproche beaucoup plus du *Tricholoma matsutake* venant au Japon et en Scandinavie, que le *Tricholoma magnivelare* que l'on trouve sur la côte du Pacifique. On se souviendra que j'avais observé pour la première fois au Québec, ce fameux matsutaké à la Baie-James en 1997. À l'aide de notre subvention, nous avons organisé une expédition dans la région de LG2 pour vérifier la présence et l'abondance de ce fameux champignon. À cette occasion, nous avons pris contact avec les Cris et les avons initiés à la récolte de ces champignons. Nous avons constaté qu'ils n'avaient aucune connaissance des champignons dans leur tradition et aucun intérêt pour cette ressource jusqu'à ce moment. Ils ont vite compris l'intérêt économique de la chose et nous ont comme écartés de leurs activités par après.

Néanmoins, les touristes, nommément japonais, fréquentent le territoire sur leur invitation.

Fondation de l'Association pour la commercialisation des champignons forestiers

En 2004, l'Alaska a connu des incendies de forêt sur d'importantes superficies et, en 2005, on y fit des récoltes record de morilles. Toujours avec notre subvention, nous avons eu le plaisir d'accueillir à Québec, dans le cadre de l'Association, Tricia Wurtz de USDA Forest, responsable de la R et D sur les champignons forestiers dans cette région. Elle nous a décrit les types de forêts brûlées en 2004 et les sites où les récoltes massives de morilles ont eu lieu en juin 2005. Belle coïncidence puisqu'au Québec en 2005, à notre tour, des surfaces significatives de forêts ont été incendiées.

Au cours de l'automne 2005 et de l'hiver 2006, j'ai mis le feu aux poudres en prenant tous les moyens possibles pour alerter les Québécois à la venue probable de grandes quantités de morilles sur les sites de ces feux en mai-juin 2006. Les journaux de l'époque ont parlé de l'Opération morille 2006. Ça a été le facteur déclenchant pour fonder l'Association et inviter le Dr Wurtz à nous parler des expériences vécues en Alaska l'année précédente. J'ai eu le privilège de voir la revue *Contact* des diplômés de l'Université Laval présenter un article sur mes prévisions repris par le *Fil des événements*. Puis, ce fut le tour de *La Presse* d'en faire autant. Toujours est-il que de nombreux mycologues explorateurs se sont rendus sur des sites incendiés. Les premiers rapports étaient négatifs lorsque soudain un appel téléphonique m'a averti qu'il y avait d'importantes quantités de morilles sur un feu près de Notre-Dame-de-la-Dorée. Ce fut la ruée et, pour la première fois au Québec, nous avons pu constater la présence des morilles de feu au Québec et en récolter en abondance.

C'est dans ce contexte que nous avons créé l'Association pour la commercialisation des champignons forestiers, le 6 février 2006 à l'Université Laval, avec Gérald Le Gal comme président. Mon discours à cette occasion répétait mon refrain : la ressource est abondante, il existe un marché, qu'attendons-nous pour nous organiser. Et j'ai terminé en disant, surtout ne vous chicanez pas, ce qui est arrivé comme de fait.

Pourtant, au fil des années, cette association a suscité la mise sur pied de nombreuses petites entreprises dont quelques-unes réussiront bien, au cours des années à venir.

Retour à mes anciennes amours

Après une carrière fort occupée par mes activités scientifiques, sans compter mes responsabilités familiales également soutenues, le temps fut venu de participer de nouveau aux activités du Cercle des mycologues amateurs de Québec. Le tout a commencé avec une rencontre du conseil d'administration que j'avais sollicitée afin de proposer l'idée de mettre sur pied la Fondation de mycologie du Québec, l'objectif étant de constituer une fiducie dont les revenus serviraient à promouvoir l'acquisition et la diffusion des connaissances en mycologie. J'ai souscrit un montant de départ et Bruno Boulet, président à l'époque, ainsi que Gaston Laflamme, en ont fait autant et ont accepté de faire partie d'un comité de mise en œuvre et de fonctionnement. Évidemment, ce fut le moment de renouveler ma carte de membre après 54 ans d'absence. Assez rapidement j'ai accepté de devenir membre à mon tour du conseil d'administration. En assistant à ces réunions et en participant aux nombreuses activités en été comme en hiver, j'ai constaté que le Cercle avait besoin de renouveau. On reparlera de mon implication dans la période des années 2010, alors qu'on m'a confié la présidence du Cercle.

Les mycorhizes: la nouvelle révolution verte

M'étant tenu à l'écart de l'enseignement depuis la fin des années 1990, mes activités de promotion de la commercialisation des champignons sylvestres et surtout la mise en œuvre de la subvention du CRSNG m'ont rapproché des étudiants que j'ai codirigés avec mon collègue Yves Piché, à cette occasion. Toute ma vie j'ai eu le privilège de travailler avec des étudiants aux études supérieures que je considérais comme des collaborateurs, plutôt que des employés. À la suite de cette nouvelle expérience de recherche, j'ai proposé à mon collègue de mettre sur pied un cours sur les symbioses végétales, en ayant soin d'écrire auparavant un livre sur ce sujet.

Je suivais depuis quelque temps déjà les activités de la maison d'édition MultiMondes, en particulier les contributions d'un de mes étudiants de la première heure, Cyrille Barette. Ainsi, au lancement d'un de ses livres en 2006, j'ai eu l'occasion de rencontrer Jean-Marc Gagnon et Lise Morin, cofondateurs de cette maison d'édition, et leur ai fait part de notre projet de publier un livre au sujet des mycorhizes. Réponse immédiate: «Quand vous serez prêts, apportez-nous le manuscrit». Il n'en fallait pas plus pour enclencher la rédaction avec mes collègues Christian Plenchette et Yves Piché. L'idée était de présenter le rôle fondamental et universel des symbioses mycorhiziennes dans l'évolution et le fonctionnement des plantes et des écosystèmes terrestres. Ce livre, à fort contenu scientifique, se voulait à la fois un instrument de vulgarisation destiné non seulement aux étudiants préuniversitaires aussi bien qu'universitaires ainsi qu'à leurs professeurs, mais également à un public plus vaste ayant de l'intérêt pour la biologie. Nous voulions également rejoindre le monde des agronomes, des forestiers et des environnementalistes. C'est ainsi que parut la première édition de notre livre, en 2008.

Bernard Bélanger, de Premier Tech, y a vu un ouvrage qui pourrait s'avérer utile aux milliers de personnes travaillant pour sa compagnie à travers le monde. Il en a financé la traduction en anglais et l'achat de 1 000 exemplaires. D'autre part, la maison d'édition Quae en France en avait distribué quelque 500 exemplaires en France et dans la Francophonie. On verra que lors de la deuxième édition les choses prendront une tout autre allure.

La dédicace de ce livre se lisait comme suit: «À Bernard Bélanger, un entrepreneur de vision qui a compris avant tous les autres l'intérêt des mycorhizes et qui a su traduire une partie de nos rêves de scientifiques en réalité concrète».

Nous devons un gros merci à notre éditeur d'avoir choisi un titre accrocheur que nous n'aurions peut être pas osé, en remplaçant notre titre *Les symbioses végétales* par *Les mycorhizes: la nouvelle révolution verte*. À en juger par les très nombreuses mentions sous ce titre dans les fureteurs, nous avons constaté que ce fut un excellent choix.

Écologie intégrative des symbioses végétales: le cours

Une fois le volume paru, avec comme toujours la collaboration de mon ami Yves, nous avons mis sur pied un cours intitulé Écologie intégrative des symbioses végétales et destiné aux étudiants en biologie, en agriculture et en foresterie au premier cycle et aux cycles supérieurs. Il s'agissait de produire un cours qui évitait les approches analytiques réunissant une grande quantité d'information avec de nombreuses analyses quantitatives et modèles de simulation, mais plutôt d'aller chercher ce qui est fondamental et universel dans le temps et dans l'espace. Le refrain que je serine de plus en plus est comme suit: «La symbiose mycorhizienne est un phénomène fondamental et universel dans l'évolution et le fonctionnement des plantes et des écosystèmes terrestres».

Un phénomène fondamental, c'est dire que sans la symbiose mycorhizienne la vie n'existerait pas sur la planète. Un phénomène universel, c'est dire que la presque totalité des plantes terrestres vivent en symbiose avec des champignons mycorhiziens. Dans l'évolution, c'est dire que les plantes et leurs champignons ont coévolué depuis leur apparition il y a quelque 400 millions d'années. Dans le fonctionnement des plantes, c'est dire que la physiologie de la plante mycorhizée est profondément modifiée par la présence de ces champignons. Et enfin le fonctionnement des écosystèmes terrestres, c'est dire que les mycorhizes sont au cœur même du fonctionnement de la pédologie et de la vie de tous les écosystèmes terrestres.

Au cours des années, nous avons semé ces idées chez plusieurs centaines d'étudiants pour qui nous croyons, ce fut l'occasion de voir le monde végétal avec des lunettes différentes de ce qu'on leur avait présenté au cours de leur formation antérieure.

Micosylva

Hé oui, on l'écrit avec mico et non myco parce que l'instigateur exceptionnel de cette activité fut Fernando Martinez-Pena, un ami espagnol de la province de Castilla y Leone dans le nord de l'Espagne. Assisté de Jean Rondin représentant la France, Fernando a soumis une demande de subvention à la Communauté économique européenne (CEE) en 2007, à la hauteur de 1,5 million d'euros pour deux ans, renouvelable pour deux autres années. L'objectif de ce projet était de définir des plans d'aménagement forestiers et des traitements sylvicoles susceptibles de conserver et promouvoir la productivité des forêts des Pyrénées en champignons sauvages. Il s'agissait d'un projet regroupant l'Espagne, la France et le Portugal.

Il faut savoir que dans la seule province de Castilla y Leone en Espagne, l'impact économique des champignons forestiers comestibles (truffes exclues) était de 60 millions d'euros. On y trouvait déjà 9000 détenteurs de permis de récolte enregistrés et 70 postes d'achat assurant la traçabilité avec les restaurateurs et les marchands. Le mycotourisme représentait alors plus de 20 millions d'euros par année. Ceci deviendra une source d'inspiration pour la filière récolte, conditionnement et mise en marché des champignons forestiers comestibles au Québec.

Dès 2007, l'Espagnol Fernando Martinez-Pena et le Français Jean Robin m'ont invité à participer à titre d'expert international aux deux rencontres annuelles pendant quatre ans. Ce fut une expérience inoubliable de voir l'organisation de la foresterie de cette province structurée autour de la filière des champignons sylvestres. Les visites sur le terrain nous ont montré des places d'observations permanentes servant de base à la mycosylviculture et l'aménagement des forêts.

Tout comme nous organisons des territoires forestiers pour la chasse et la pêche, dans cette province espagnole, l'organisation tourne autour de la récolte des champignons forestiers. Sur la presque totalité du territoire, on retrouve des sentiers balisés avec les règlements à leur entrée. Les sites pour la récolte commerciale sont séparés de ceux destinés à la récolte personnelle. On doit acheter des permis appropriés selon le type de récolte et les prix varient s'il s'agit de résidents ou de visiteurs. Les nombreux postes d'achat et de conditionnement sont équipés pour recevoir, trier, classer et conserver les diverses espèces, une importante partie étant écoulee en frais. La presque totalité des restaurants de la province offrent 12 mois par année des champignons sylvestres. On ne confond pas les champignons cultivés (par exemple, les pleurotes) avec les champignons sauvages,

comme on le fait trop souvent ici. Cette ressource attire de nombreux touristes, ce qui fait le bonheur des hôteliers. Cette province espagnole constitue donc le modèle par excellence pour le développement de cette filière.

Un deuxième colloque international sur les champignons forestiers comestibles à Québec

À la suite de la fondation de l'Association pour la commercialisation des champignons forestiers (ACCHF) en 2006, le Québec a connu un succès mitigé dans le développement de cette filière. On note, encore en ce moment, une absence totale des ministères québécois pour en appuyer le développement. Ayant vécu mes premières expériences avec Micosylva, il devenait urgent d'attacher publiquement le grelot. Dans ce contexte, avec le soutien du Centre d'études de la forêt ainsi que de Biopterre, nous avons organisé ce deuxième événement, dix ans après celui de 1999. À cette occasion, nous avons invité des conférenciers attachés à Micosylva, ainsi que plusieurs intervenants d'Amérique du Nord, incluant le Mexique. Nous avons eu une très faible représentation des ministères et l'un de ces représentants m'a confié que pour lui cet engouement pour les champignons, ce n'était qu'une mode qui passera.

Tout de même, l'assistance regroupant quelque 150 personnes, dont plusieurs des régions, a manifesté un intérêt renouvelé. Encore une fois, le développement en croissance accélérée de cette filière sur la côte du Pacifique a été souligné par trois conférenciers, un de Colombie-Britannique et deux de l'Oregon. De toute évidence, le Mexique était en voie de nous doubler.

La plus grande retombée de cette rencontre fut de convaincre un bon nombre de membres de l'ACCHF et en particulier les représentants de Biopterre, que le modèle européen, en particulier celui de Castilla y Leone, constitue

la plus belle démonstration au monde de l'importance prise dans l'économie d'une région par la filière mycologique. En conséquence, on ne compte plus les Québécois qui se sont rendus dans cette province du nord de l'Espagne pour constater *de visu* comment on s'y organise dans tous les aspects de la valorisation des champignons forestiers. Au moment de préparer ce livre en 2018, une délégation, organisée par Maxim Tardif et Pascale Malenfant, sous l'égide de Biopterre, était encore une fois en visite en Espagne, chez Fernando. Ces visites sont sans doute un événement majeur qui a réveillé des entrepreneurs québécois. Il est intéressant de noter que le MAPAQ a récemment identifié une personne pour s'occuper des produits forestiers non ligneux (PFNL), incluant les champignons.

Cette réalisation a clôturé mes activités des années 2010. Les comptes rendus de cette rencontre de 2009 sont disponibles sur le site de Biopterre.

Chapitre 9

LES NOUVEAUX PARADIGMES DES ANNÉES 2010

Présidence du Cercle des mycologues amateurs de Québec

Avant de parler de trois chantiers de recherches innovatrices à l'Université Laval, voici quelques mots sur mes implications en mycologie amateur. Au milieu des années 2000, je m'étais rapproché de nouveau du Cercle des mycologues amateurs de Québec, dont je m'étais éloigné pendant mes 40 années trépidantes comme chercheur et professeur. J'ai alors trouvé un cercle un peu léthargique qui comptait au plus 150 membres. Je voyais en parallèle un groupe de passionnés de la mycologie plus scientifique qui était tenu à l'écart par les administrateurs de l'époque. Nommé au conseil d'administration, j'ai constaté que la majorité des membres étaient là depuis plusieurs années. Au cours d'une soirée houleuse, il y a eu démission du président qui aurait aimé se rapprocher du groupe de passionnés écartés et deux autres anciens membres de ce CA.

C'est ainsi qu'au printemps 2010, j'en suis venu à prendre la présidence du CMAQ. Je pense avoir réussi à redynamiser ce cercle en attirant de nouveaux membres au conseil d'administration.

La nouvelle équipe, Herman Lambert en tête, a rajeuni le *Boletín*, journal du Cercle, et Louise Côté est devenue une trésorière irremplaçable pendant les cinq années suivantes.

En 2011, le Cercle fondé en 1951 par le Dr René Pomerleau a fêté son 60^e anniversaire. Dans les belles années au temps de René Cauchon et son épouse Rose, le Cercle organisait le banquet de la fête des Rois en janvier. À cette occasion, des membres mettaient l'épaule à la roue et préparaient des petits plats variés. De façon conviviale, quelques dizaines de membres participaient aux agapes. Par après, cette tradition s'est perdue, de sorte qu'à la fin des années 2000, cette activité se tenait plutôt dans divers restaurants.

Pour le 60^e anniversaire, j'ai proposé de revenir à la vieille tradition et d'inviter les membres à concocter des petits plats aux champignons sauvages à offrir aux participants sous forme de bouchées variés. Nous avons choisi une salle de bonne dimension dans un endroit pourvu de deux cuisines avec tout ce qu'il fallait pour réussir l'activité.

Cet événement est devenu mémorable et, à cette occasion, une équipe avec Jean-Paul Blais et sa compagne Francine Dupont en tête a concerté la participation de plusieurs membres pour publier un livre de 60 recettes à l'occasion du 60^e anniversaire. La tenue de cet événement a eu un effet d'entraînement pour les membres du CA et s'est traduite par un rajeunissement de toutes les activités: nouveaux sites de récolte pour les excursions d'été, nouvelle animation des soirées d'identification ouvertes au public les lundis soirs à Maizerets, renouvellement accéléré du *Boletín*, etc. Pendant cette même période, le rapprochement avec les passionnés de Mycoquébec, Roland Labbé et Jacques Landry s'est enfin amorcé.

Mon objectif n'est pas ici de faire l'histoire du Cercle des mycologues amateurs de Québec. Je me contenterai de dire qu'à la suite de ce renouveau, ce cercle est devenu des plus dynamiques. On y compte maintenant plus de 300 membres et le mariage du cercle avec le groupe Mycoquébec s'est définitivement concrétisé par la venue au CA de Jacques Landry

en 2016, concepteur de ce site extraordinaire accessible à tous. Il est devenu un outil de réunion et de dissémination des connaissances sur les champignons de classe mondiale. Longue vie au Cercle des mycologues amateurs de Québec et son ami Mycoquébec.

Je ne saurais clore cet exposé sur le CMAQ sans mentionner la mise sur pied de la Fondation de mycologie du Québec. Très tôt après mon retour au CMAQ, vers la fin des années 2000, j'ai proposé au Cercle de mettre sur pied la Fondation de mycologie du Québec pour recueillir de l'argent dans le but de promouvoir la science des champignons, en particulier en intéressant des jeunes à faire carrière dans cette discipline. Cette fondation a été créée par le Cercle et est gérée par la Fondation Québec philanthrope. Encore jeune, le Fonds contient plus de 20000 \$ et commence à générer suffisamment de revenus annuels pour remettre des bourses à des jeunes, sélectionnés pour participer à l'Expo-sciences provinciale, sur un sujet mycologique. Chaque année, lors des agapes mycogastromiques de janvier, les frais d'inscription comportent un montant pour la Fondation. Il est toujours temps de souscrire, des reçus d'impôt étant incitatifs.

La mycophagie animale: un nouveau chantier

Au cours de mes visites à la Baie-James, on se souvient que j'ai été émerveillé par l'étonnante abondance subite des fructifications de champignons mycorrhiziens à partir du 15 août. Nous avons expliqué plus haut comment ceci nous a inspiré pour provoquer, au laboratoire, la fructification d'un de ces champignons en simulant les jours longs de l'été en plaçant des plants de pins inoculés avec le laccaire en chambres de croissance contrôlées, pour le soumettre après quelques semaines à des jours courts simulant la diminution de la durée d'éclairement se manifestant de façon très marquée sous ces hautes latitudes, dès la mi-août. En 1997, à des

Inuits qui voyaient mon intérêt pour les champignons, j'ai demandé s'ils les utilisaient. Leur réponse a été laconique: «That's Cariboo food». Vous comprenez que ceci a allumé instantanément une lumière. Mon ami Gérald Le Gal qui avait obtenu la même réponse de la part des Inuits m'a alors raconté comment, en récoltant des champignons à l'automne au nord de Montréal, il a observé les chevreuils gratter le sol pour déterrer des champignons hypogés (formant leurs fructifications sous le sol). Tellement préoccupés par cette activité, les chevreuils oubliaient sa présence pour déguerpir rendus à quelques mètres.

Au risque de me répéter, on se souviendra comment une recherche de la littérature m'a mené à une publication dans la revue scandinave *Rangifer* parue en 2007. Une équipe a effectué une enquête auprès des propriétaires de cheptels de rennes afin de savoir ce que ces animaux consomment aux diverses périodes de l'année. Ainsi, on constate que tout au long de l'année les lichens demeurent présents dans leur régime. Au début de l'été, les jeunes rameaux d'arbres et d'arbustes occupent une place importante et, à partir du 15 août, les champignons deviennent une nourriture de choix. Les personnes interviewées ont mentionné que dans cette période les rennes recherchent activement les champignons et il devient impossible de les ramener au bercail. On mentionne de plus qu'à la suite de l'enneigement, les animaux continuent de consommer les champignons ensevelis sous la neige dans les tapis de lichen. Ceci recoupe mon observation de 1997 à La Forge vers la tête de la Grande Rivière où j'ai vu de très grandes quantités de champignons, incluant le matsutaké, être ensevelies sous la première couche permanente de neige. Si les rennes de Scandinavie ont un tel intérêt pour les champignons, pourquoi pas nos caribous?

Pendant ce temps, mon collègue de toujours Jim Trappe et son équipe effectuaient des recherches pour inventer ces nombreux champignons qui, à l'instar des truffes, produisent leurs fruits sous le sol. À travers cette recherche intensive, ils ont expliqué comment la grande chouette du nord sur la côte du Pacifique a été menacée d'extinction par les coupes forestières, à la fin des années 1990. Il a fallu pour cela remonter la chaîne alimentaire de cette chouette, le polatouche (écureuil volant) constituant sa principale proie. Or, la diète du polatouche est constituée à près de 90% de champignons, dont la principale espèce vit en symbiose avec l'essence d'arbres sévèrement coupés. En bon aménagiste, les forestiers ont replanté toutes ces surfaces déboisées avec une essence légèrement différente ne pouvant toutefois pas héberger le champignon hypogé recherché par le polatouche. L'équipe de Jim Trappe a immédiatement recommandé le reboisement avec l'essence d'origine et c'est qui a sauvé de l'extinction cette chouette en péril.

Tout au long de ces années 2000, je n'ai raté aucune occasion de parler de l'intérêt des champignons hypogés pour la nourriture des animaux sauvages et d'une éventuelle trouvaille d'une truffe gastronomique québécoise comparable à la délicieuse truffe de l'Oregon repérée par l'équipe de Jim Trappe.

Avec mon retour comme président du Cercle des mycologues amateurs et à la suite de ma participation à Micosylva, j'ai tenté de promouvoir l'intérêt des membres pour les champignons hypogés comme les truffes. Après deux années d'enthousiasme, le tout s'est refroidi lentement. Je n'allais pas reculer pour autant, constatant que cette thématique devait d'abord être abordée par des scientifiques. Ainsi, j'ai conçu un projet visant à vérifier la consommation des champignons hypogés par les rongeurs forestiers. Sur les pistes des chercheurs de la côte du Pacifique entraînés par Jim

Trappe, j'ai proposé d'abord de tenter la détection de telles fructifications par grattage systématique de la surface d'un sol forestier à la forêt Montmorency, En deuxième lieu, j'ai proposé d'installer des bardeaux de cèdres recouverts de nourriture à hamsters emprisonnée dans de la cire, de façon à inviter les rongeurs à séjourner suffisamment longtemps sur ces bardeaux pour y laisser des fèces. Par après, nous pourrions détecter les espèces fongiques dans les fèces et l'identité des animaux les ayant mangées par l'analyse de l'ADN dans ces déjections et les poils recueillis.

Soumis au FQRNT équipe par André Desrochers, cette subvention a permis de recruter une première étudiante au doctorat, Véronique Cloutier sous la direction du professeur Desrochers et la codirection de mon complice de toujours, Yves Piché.

Véronique a complété une excellente thèse de Ph. D. innovatrice sur ce sujet.

Le fameux *Rhizoglomus irregulare* DAOM 197198: vedette internationale

On se souviendra que j'avais rencontré Alok Adholeya à Delhi en 1991, lors de mes visites de projets en Inde sous l'égide du CRDI et lui avais fait part de notre méthode de production des inoculum mycorhiziens sur cultures de racines. J'ai eu l'occasion d'échanger avec lui à diverses reprises au fil des années et même de le recevoir au Québec. C'est lors de cette visite à la fin des années 1990 qu'il m'a appris être en voie de construire un laboratoire pour la production industrielle d'inoculum mycorhiziens, ce laboratoire étant totalement financé par l'État via Tata Energy.

À l'occasion de la 7^e ICOM de Delhi en 2013, j'ai pu rencontrer une étonnante brochette de scientifiques très compétents qui m'ont amené visiter des dizaines de démons-

trations de l'efficacité de l'inoculation mycorhiziennes sur un grand nombre de cultures vivrières. Il faut savoir que l'Inde ne possède aucun dépôt de phosphates sédimentaires et dépend totalement de l'extérieur pour les fertilisants phosphates. Pour l'Inde, ces fertilisants chimiques sont trop onéreux. Mais Il faut savoir aussi que les sols contiennent en général 35 ppm de phosphate soluble et également d'importantes réserves sous forme immobilisée, accessible aux plantes par les mycorhizes et leurs bactéries associées, les *Burkholderia* (voir découverte de Salma Taktek).

Dans toutes ces régions, on nous présentait une démonstration aux champs, avec à gauche la culture fertilisée au superphosphate, à droite la même culture inoculée où on avait réduit le superphosphate de 25%. Dans toutes les régions et chez toutes espèces, il n'y avait aucune différence de croissance. Encore plus sur la droite, on avait coupé le superphosphate de moitié et la majorité des espèces de plantes ont fait aussi bien que celle ayant reçu la pleine concentration à l'extrême gauche. Finalement, à l'extrême droite, on avait coupé le phosphate de 75% et encore là un bon nombre d'espèces ont fait tout aussi bien que celle ayant reçu la pleine dose d'engrais chimique. J'ai retenu cette incroyable leçon m'ayant fait germé des idées dans la tête et qui m'a conduit à m'intéresser à l'apatite.

Ce qui est particulièrement intéressant dans tout cela, c'est que tous ces résultats ont été obtenus avec notre fameux *Glomus irregulare* DAOM 197198 isolé de racines de frênes, venant de Pont-Rouge en 1978. Ce champignon, également utilisé chez Premier Tech, est en voie de s'étendre partout au monde.

On me pose souvent la question à savoir s'il est concevable qu'un seul isolat d'une seule espèce de champignon mycorhizien arbusculaire puisse satisfaire les besoins de

toutes les plantes cultivées au monde. Il faut savoir que pour accommoder les quelque 300 000 espèces de plantes vasculaires arbusculaires de la planète, il existe environ 250 espèces de ces champignons dont un grand nombre ont des distributions très réduites. Ce sont des champignons dont les spores contiennent quelques milliers de noyaux n'étant pas tous génétiquement identiques ainsi que des mitochondries à profils variables. Cette plasticité génétique se traduit par une plasticité éco-physiologique permettant à une seule espèce de champignon d'accommoder des milliers d'espèces de plantes vasculaires dans des environnements des plus variés. Non seulement faut-il travailler avec un champignon efficace sur un maximum d'espèces de plantes dans divers environnements, mais il faut surtout que l'isolat de cette espèce se prête à la multiplication aseptique des spores à l'échelle industrielle, soit des centaines milliards par années. Dans tous ces chapitres, l'isolat du *Glomus irregulare* DAOM 197198 de Pont-Rouge s'est avéré champion toutes catégories comme inoculant de choix pour les plantes cultivées un peu partout au monde, en commençant par le Canada.

On pourrait comparer la capacité de vivre de ce champignon partout dans le monde à celle de la mouche domestique!

Fertilité et nutrition des arbres, un nouveau paradigme

À chacune de mes visites à Manic 5, Outardes 4 et LG2, je revenais toujours perplexe à savoir d'où pouvaient venir tous les éléments minéraux essentiels à la croissance des arbres et des plantes sur des amas de roches ou dans le gravier avec bois raméaux fragmentés.

À la fin des années 2000 et au début des années 2010, des collègues anglais et suédois ont commencé à démontrer que sous des conditions contrôlées au laboratoire on peut

observer une préférence des champignons ectomycorhiziens pour l'apatite et le feldspath, respectivement sources de phosphore et de potassium.

Quant à l'azote, il est apparu que les sources préférées de cet élément sont sous forme d'acides aminés, à tel point que les mycorhizes récupèrent leur azote à partir des protéines en séparant les divers acides aminés par leurs enzymes protéolytiques. On a également démontré que la solution de sol dans les forêts conifériennes comporte plus de 80% de son contenu en azote sous forme d'acides aminés et le reste avec un peu d'ammonium et très peu de nitrates. Pourtant, tous les pédologues forestiers de la planète continuent de baser la fertilité de ces sols à partir des teneurs en ammonium et en nitrate. Il y a déjà là suffisamment de matière pour parler d'un nouveau paradigme.

Si l'azote occupe le premier rang des éléments nutritifs essentiels pour les plantes, le phosphore occupe le deuxième rang. Comment les plantes des milieux naturels obtiennent-elles leur phosphore? Il faut savoir que l'émergence des continents, il y a plus de 400 millions d'années, s'est faite à partir de grandes activités volcaniques. Des montagnes et des sédiments formés de cendres volcaniques dans les estuaires sont apparus. La conquête des montagnes ne deviendra possible que 200 millions d'années plus tard avec l'arrivée des ectomycorhizes. Les premières plantes vasculaires de ces estuaires ont dû apprendre à prélever leur phosphore à partir de cendres volcaniques.

Ce fut d'abord tout un défi pour que les algues du milieu marin permettent l'évolution des premières bryophytes sur les continents et conduisent aux premières plantes vasculaires, comme en témoignent les Rhynia et les Asteroxylon, dont on retrouve les fossiles dans les dépôts de Chert en Écosse. L'examen de ces structures racinaires primitives

montre l'omniprésence de champignons ayant les mêmes structures que celles qu'on observe chez le maïs ou l'érable à sucre aujourd'hui. L'apparition des mycorhizes arbusculaires a été au départ de la vie terrestre sur les continents et a suivi l'évolution de toutes les plantes vasculaires telles qu'on les connaît aujourd'hui.

Si l'azote a pu venir de la fixation biologique par des bactéries du sol, l'obtention du phosphore à partir de l'apatite d'origine volcanique a nécessité non seulement la présence des mycorhizes, mais en toute vraisemblance, selon ce que nous savons maintenant, une association étroite avec des bactéries solubilisant l'apatite aurait été nécessaire dès le départ. On a également appris que la presque totalité des plantes venant en milieux naturels sur la planète obtiennent leur phosphore à partir d'apatite et non de phosphates originaires de sédiments marins provenant de coquillages.

Si les mycorhizes arbusculaires ont dû dès le départ trouver leur phosphore dans l'apatite, les ectomycorhizes associées à l'évolution des conifères apparus 200 millions d'années plus tard ont été confrontées au même problème, n'ayant pas hérité des propriétés des mycorhizes arbusculaires. Même problème, même solution?

Une subvention pour examiner ce nouveau paradigme sur la nutrition des arbres

Ayant pris connaissance des travaux des collègues anglais et suédois sur la capacité des ectomycorhizes d'utiliser l'apatite au laboratoire, j'ai consulté le ministère des Ressources naturelles pour savoir s'il existe des dépôts d'apatite au Québec. On m'a mis en contact avec le Dr Nadège Tolari qui travaillait à ce moment chez Ariane phosphate, une entreprise évaluant l'intérêt d'exploiter le dépôt d'apatite situé au lac à Paul au nord du Lac-Saint-Jean. Très rapidement on m'a confirmé que nous pourrions compter sur quelques centaines

de kilos d'un concentré d'apatite comportant 17% de phosphore et 35% de calcium.

Ce fut la bougie d'allumage m'ayant incité à rédiger une demande de subvention FQRNT avec mon copain de toujours, Yves Piché. Nous nous sommes associés avec le professeur Alison Munson de l'Université Laval, du professeur Hubert Morin de l'UQAC, ainsi qu'avec David Paré du Centre forestier des Laurentides et Nelson Thiffault du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec. Un étudiant brillant, Laurent Fontaine, est venu sauver la mise à la suite de la défection du principal étudiant au Ph. D. impliqué dans cette recherche.

Après une mise en situation de la problématique visée, nous avons proposé trois objectifs: a) Peut-on utiliser directement le concentré d'apatite en poudre comme fertilisant forestier? b) Les champignons ectomycorhiziens sont-ils capables de dissoudre l'apatite, seuls ou accompagnés de bactéries, sous des conditions de laboratoire? c) Pourrait-on utiliser la poudre d'apatite comme fertilisant dans la production des plants forestiers?

Fertilisation en forêt

Ayant fertilisé des épinettes blanches en plantation à la forêt Montmorency, nous avons observé une augmentation de l'épaisseur des anneaux de croissance, une année après l'application. Bien sûr, on ne pouvait crier victoire après une seule année, mais ceci ouvrait d'intéressantes perspectives. On peut imaginer l'utilisation de ce concentré pour la fertilisation de très grandes surfaces de forêt, permettant non seulement l'accélération de la production de matière ligneuse, mais aussi de créer un énorme puits de carbone. Cette approche serait plus rapide que de compter sur la plantation de jeunes arbres. Bien sûr, tout ceci devra faire l'objet

d'autres recherches, mais on peut entrevoir la possibilité d'utiliser ce concentré d'apatite sans transformation chimique non seulement pour fertiliser et augmenter la croissance des arbres, mais également pour constituer vraiment cet énorme puits de carbone. En Suisse, on a constaté que l'augmentation du CO₂ atmosphérique a peu d'effet sur la croissance des arbres forestiers, les nutriments minéraux limitant cette croissance. Pour le moment, ces résultats préliminaires n'ont pas eu de suite. J'espère que l'IRBV pourra prendre la relève.

Nous avons également appris que le feldspath pourrait aussi servir de fertilisant, mais le rôle de cet élément étant important pour la translocation des sucres, il faudrait voir son importance pour la croissance en hauteur et en largeur des arbres. Un résultat qui mène à autant de questions que de résultats. C'est à suivre! Beaux sujets de thèse.

Dissolution de l'apatite en laboratoire

Laurent Fontaine, dans son mémoire de M. Sc., a constaté que plusieurs espèces de champignons ectomycorhiziens ont la capacité de dissoudre le concentré d'apatite isolément, alors que d'autres espèces nécessitent l'accompagnement de bactéries s'accrochant aux mycéliums. Nous avons démontré qu'un cristal d'apatite concentré de 120 μ , observé au microscope, se voit totalement décomposé en moins de 24 h, à condition que la teneur en fluor soit au voisinage de 1%; avec 4%, c'est plus difficile.

Production des plants forestiers

Avec les difficultés rencontrées par la défection tardive d'un étudiant, nous n'avons pas pu poursuivre correctement ce troisième objectif. Tout de même, la table est mise pour vérifier cette approche qui permettrait d'éliminer les superphosphates dont la percolation hors des récipients peut

poser problème à l'environnement. C'est également à suivre. Beau sujet de thèse!

Mohammed Lamhamedi ayant élaboré sa thèse de Ph. D. avec moi poursuit des travaux innovateurs sur la production des plants forestiers permettant un développement intense des ectomycorhizes formant une motte cohérente sans compter les autres avantages. Il a ainsi apporté une solution au problème des mottes qui se désagrègent au moment de la plantation, responsable de mauvaises reprises.

De façon générale, on peut dire qu'il s'agit bien d'un nouveau paradigme sur la fertilité et la nutrition des arbres forestiers suggérant que les analyses de sols forestiers effectuées partout dans le monde pour y déceler les ions phosphates solubles seraient totalement inutiles. On devrait plutôt se préoccuper de la présence du fluorapatite et de sa distribution dans le profil de sol.

Explication de la croissance des arbres à Manic 5, Outardes 4 et La Grande

Pendant plus de 35 ans, je me suis demandé comment les arbres venus sur les sites enrichis par le passage des aulnes ont pu obtenir tous les éléments nutritifs essentiels à leur croissance. Ce questionnement s'applique également aux aulnes en ce qui a trait au phosphore, potassium, calcium, magnésium, fer, molybdène, manganèse, etc.

La subvention FQRNT nous a donc permis d'expliquer comment les aulnes et les peupliers baumiers ont pu coloniser les assises rocheuses de Manic 5, les sites graveleux d'Outardes 4 avec l'assistance de bois raméaux fragmentés, les aulnes ne pouvant pousser sur de tels sites et finalement l'ensemble des ouvrages, barrages et remblais, réalisés sur le complexe de la rivière La Grande. En janvier 2016, l'émission d'ICI Télé, La Semaine verte, sur les mycorhizes a fait état

de façon superbe de cette reprise de la végétation forestière sur ces assises rocheuses, sans aucun ajout de fertilisant.

Le dépérissement des érablières

À la fin du siècle dernier, on a constaté la présence d'un dépérissement des érablières accompagné de l'acidification des sols. On a rapidement conclu que le phénomène était lié aux précipitations acides venant des usines d'extraction des minéraux situées plus à l'ouest. On a pris les grands moyens pour que ces usines réduisent et même éliminent ces polluants de leurs émissions. Mais le mal était fait. Les sols sont toujours acides et le dépérissement toujours présent. Il faut savoir que la presque totalité des végétaux de la planète obtiennent leur phosphore à partir du fluorapatite, mais ce qui est peut-être aussi important c'est qu'en dissolvant l'apatite avec mycorhizes et bactéries associées une importante quantité de calcium est également libérée.

En pratique forestière, on a plutôt décidé de suivre le modèle agricole artificiel en chaulant les érablières par hélicoptère. Bien sûr, on obtient un résultat instantané qui charme les acériculteurs, mais à quel prix?

Ce chaulage visant à réduire l'acidité a des effets pervers. Il immobilise fortement le phosphore et après quelques années les vendeurs de superphosphates offrent aux acériculteurs un autre remède miracle. De plus, ce chaulage excite la flore microbienne du sol et conduirait à une importante réduction de la matière organique du sol, dont une des fonctions est de retenir les cations tels que le potassium et le magnésium. Une fois que l'on prend la piste agronomique pour la fertilisation des érablières, on en vient à suivre un modèle artificiel qui nécessitera des fertilisations à tout jamais. À la suite de la fameuse publication de Blum et son équipe en Nouvelle-Angleterre, il nous apparaît beaucoup plus pertinent d'intervenir en restaurant la teneur en apatite

naturelle. J'espère que quelqu'un pourra valider cette hypothèse au cours des prochaines années.

Découverte du mycorhizobiome des plantes des plantes agricoles

Le phosphore est un élément essentiel à la vie. Pour nourrir la planète, l'agriculture doit produire des récoltes très exigeantes en phosphore (P). Cette grande consommation est liée au fait que la grande majorité du P soluble produit chimiquement que l'on applique n'est pas utilisée par les plantes et s'accumule dans le sol sous formes insolubles. Ainsi, la fertilisation couramment recommandée pour les pommes de terre au Québec est de 225 kg à l'hectare. Dans les pommes de terre récoltées, on ne trouve que 25 kg de phosphore. Où sont passés les autres 200 kg? Après 10 ans, cela représenterait 2 tonnes de phosphore.

L'extraction, la transformation et le transport des phosphates pour produire des engrais solubles comportent aussi des coûts énergétiques énormes et constituent une source de pollution sur les sites mêmes de leur production, sans compter les sols agricoles. Il devient donc très important d'utiliser un système d'agriculture durable qui diminuera l'utilisation des engrais de P soluble. À cette fin, on doit mettre à profit l'activité des mycorhizes.

Nous avons conçu et obtenu une autre subvention FQRNT sous la direction de Hani Antoun accompagné de Martin Trépanier de la Faculté d'agriculture, de Yves Piché et moi-même de foresterie, ainsi que Marc St-Arnaud de l'IRBV à Montréal.

Avec Hani Antoun, un expert mondialement reconnu en matière de bactéries solubilisant les phosphates de roche, nous avons formulé l'hypothèse que des bactéries du sol solubilisant les phosphates seraient beaucoup plus efficaces,

si elles vivaient en étroite association avec le mycélium des champignons. Nous avons donc comme objectif de développer un système de biofertilisants permettant aux plantes agricoles d'utiliser le P immobilisé dans le sol sous diverses formes ainsi que le minerai d'apatite en voie d'exploitation au Québec. Tout comme pour le projet en foresterie, l'entreprise Ariane Phosphates a mis à notre disposition du concentré d'apatite à fine granulométrie contenant 17% de P et 35% de Ca. Cette subvention devait nous conduire à une découverte retentissante.

L'hypothèse voulant que des bactéries solubilisant les phosphates de roche adhérant étroitement aux mycéliums des champignons arbusculaires seraient beaucoup plus efficaces que celles vivant librement dans le sol. Dans cette situation, elles auraient accès de façon continue à l'énergie provenant de la plante via le mycélium du champignon mycorrhizien, plutôt que d'être continuellement à la recherche de cette source d'énergie dans le sol en compétition avec la myriade d'autres microorganismes qui s'y trouvent. D'autre part, si de telles bactéries libres dans le sol réussissent à obtenir de l'énergie et à dissoudre le phosphate de roche, le phosphate soluble ainsi produit retournera à l'état de pierre avant que la plante puisse en profiter.

Nous avons donc conduit la recherche en trois étapes: a) capter des bactéries vivant étroitement associées au mycélium d'un champignon arbusculaire et évaluer leur capacité à dissoudre les phosphates de roche, b) bien vérifier la capacité des bactéries efficaces obtenues à coller à la surface du mycélium des champignons en formant des biofilms, c) démontrer, en serre, le fonctionnement de cette triple symbiose en présence d'apatite pour faire croître des plants de maïs comparativement avec l'addition de superphosphates seuls.

Les trois hypothèses s'étant avérées, nous avons proposé la candidature de Salma Taktek aux découvertes de l'année au magazine *Québec Science*. Non seulement cette découverte a-t-elle été retenue dans les dix sélectionnées, mais elle a également reçu le coup de cœur du public. Vous avez compris que ce travail a été effectué par Salma Taktek pour l'obtention d'un Ph. D. à l'automne 2015. Salma nous est venue de Tunisie avec une préparation exceptionnelle, B. Sc. et M. Sc. en génie biotechnologique décernés par l'Université de Sfax. Bravo Salma! Bravo Hani! Bravo Yves et Marc!

Ces résultats permettent d'entrevoir des pratiques agricoles conçues à partir du comportement des plantes de l'ensemble de la planète dont le fonctionnement est basé sur une triple symbiose impliquant les champignons mycorhiziens et leur microbiote associé.

Nous avons vu que Premier Tech est en voie de convaincre le monde agricole d'utiliser son inoculum mycorhizien à grande échelle. En 2018, les agriculteurs ont utilisé le fameux *Rhizogloium irregulare* de Pont-Rouge sur 400 000 hectares au Canada seulement, avec une croissance de 20 à 30% annuellement. À ce rythme, ce seront 1 million d'hectares qui profiteront des mycorhizes en 2022. Pour ces agriculteurs, les plantes obtiennent leur phosphore très rapidement et sont même capables d'utiliser les phosphates de roche et l'apatite avec l'aide de bactéries du sol. Ceci pourrait fort bien nous conduire à une importante réduction des phosphates chimiques solubles, voire à une élimination de cette forme d'engrais. Dans un nombre de cas de plus en plus grand, les agriculteurs observent un contrôle de maladies fongiques et de nématodes. Leurs cultures résistent mieux aux épisodes de sécheresse et nécessitent moins d'irrigation. Sans compter que les preuves s'additionnent que la composition biochimique des plantes se voit modifier par les mycorhizes ce qui, semble-t-il, se traduirait dans le goût

des aliments. Finalement, par la génération de glomaline, une glycoprotéine, les champignons arbusculaires provoquent l'agrégation des particules de sol, argile, limon et sable fin conduisant au grumelage des sols si apprécié comme facteur physique important en fertilité des sols. Ces grumeaux améliorent l'aération des sols, retiennent les nutriments et favorisent la pénétration de l'eau dans les sols, prévenant ainsi l'écoulement de surface susceptible d'entraîner les nutriments dans les cours d'eau.

Au rythme où vont les choses, Premier Tech planche présentement sur la construction de deux autres usines au Canada avec chacune une capacité de production pour un million d'hectares.

Les gains de productivité moyens, selon les cultures, étant de 100\$/ha, tout en réduisant les fertilisants et les biocides, représenteraient une injection annuelle minimale dans l'économie canadienne de 400 millions de dollars par année! C'est à suivre.

Les mycorhizes: l'essor de la nouvelle révolution verte

En 2015, la première édition de notre volume paru en 2008 était épuisée, après deux réimpressions. Au cours des sept années précédentes, les publications sur les mycorhizes dans les revues scientifiques mondiales ont connu une progression remarquable, avec plus de 7000 titres. La première édition ayant pris un coup de vieux, le temps était venu de préparer un nouveau manuscrit revu et augmenté, avec l'encouragement indéfectible de notre éditeur, Jean-Marc Gagnon, des Éditions MultiMondes. Lors de la première édition, celui-ci avait convaincu la maison d'édition Quae de l'INRA en France de distribuer ce volume sous leur enseigne. On a accepté d'imprimer 500 exemplaires, mais par la suite, cette collaboration avait pris fin.

Donc en mars 2015, les Éditions MultiMondes démarrent la production de la nouvelle édition de notre volume, revue et augmentée et notre ami Jean-Marc Gagnon, lors du Salon du livre à Paris, rencontre le nouveau responsable de l'édition chez Quae et le convainc d'en faire également une édition sous cette enseigne. Cette nouvelle édition au Québec ainsi qu'en France (mars 2016) connaît un succès remarquable.

Plaidoyer pour la modification des principes et des pratiques agricoles

Il faut savoir que tous les principes et les applications en agriculture ont été conçus et sont appliqués, comme si les mycorhizes n'existaient pas. Or, elles existent depuis plus de 400 millions d'années, ont coévolué avec toutes les plantes de la planète et transforment la physiologie des plantes notamment leur nutrition, leur résistance à la sécheresse ainsi qu'aux ravageurs, en plus d'améliorer la physique des sols et le goût des aliments. On doit donc repenser les principes de l'agriculture ainsi que leurs applications, notamment en matière de fertilisants et de biocides.

Les gains de productivité observés par les agriculteurs se manifestent, semble-t-il, sans que les apports en fertilisants et l'utilisation des pesticides aient été ajustés en présence des mycorhizes. Il y a fort à parier que les augmentations de productivité seront encore plus marquées, si on ajuste ces applications en présence de mycorhizes, avec les diminutions des coûts de ces intrants. Ceci c'est sans compter sur les résultats négatifs parfois obtenus lorsque les agriculteurs procèdent unilatéralement à la diminution des fertilisants.

Par exemple, un producteur de soja de l'Estrie a eu toute une surprise. Ayant utilisé les rhizobiums et les mycorhizes pour cette légumineuse, il a sans doute éliminé l'apport en phosphate de potassium. Comme conséquence, il a vu ses plantes connaître une croissance remarquable, fleurir dix

jours plus tôt et porter plus de fleurs. Cependant, quelle ne fut pas sa surprise en septembre de constater qu'il ne s'est formé aucune fève dans les gousses. De quoi faire saliver les mycorrhizosceptiques et les mycorrhizophobes. Cherchez l'erreur!

Il m'arrive souvent de demander à des gens du monde agricole, chercheurs, étudiants, praticiens et autres quel est le rôle du potassium dans la plante. Jusqu'à présent, je n'ai eu que rarement la bonne réponse. Parmi les rôles du potassium, on compte la translocation des sucres vers les racines, les fruits ainsi que les tubercules chez la patate. En supprimant l'apport de phosphate de potassium, ce dernier élément devient le facteur limite, ce qui explique l'absence de fèves dans les gousses de notre producteur de soja de l'Estrie. Il aurait fallu qu'il ajoute du muriate de potassium, forme sous laquelle on le sort du sol dans l'Ouest canadien.

Morale de cette histoire: pour une utilisation optimale des mycorhizes en maximisant les rendements, il faudra refaire les grilles de fertilisations. Mais où prendre l'argent pour ce faire?

Sur trois millions d'hectares qui recevront l'inoculum vers 2022, on pourra obtenir sans optimisation des autres intrants une arrivée nette dans l'économie annuelle du Canada allant de 300 à 900 millions de dollars annuellement! Il y a plus de 20 millions d'hectares en culture au Canada qui pourront bénéficier de cette nouvelle technologie. Faites le calcul.

Il faut vraiment repenser nos pratiques agricoles à la lumière des mycorhizes, c'est rentable et ça presse!

Écologie intégrative des symbioses végétales

On n'arrête pas le progrès et il faut continuellement s'ajuster aux nouvelles techniques, en enseignement comme ailleurs.

Après 10 ans de présentation en salles de cours sur cette thématique, Yves Piché m'a convaincu de passer à l'enseignement à distance pour dispenser notre cours basé sur la nouvelle édition de notre livre. Ce cours visait à présenter une vision la plus large possible des symbioses mycorhiziennes et autres dans le temps et dans l'espace, sous le fameux paradigme que je ne cesse de seriner: la symbiose mycorhizienne, un phénomène fondamental et universel dans l'évolution et le fonctionnement des plantes et des écosystèmes terrestres, plusieurs fois répété dans ce document.

Au cours des années, une vingtaine d'étudiants en biologie se sont présentés chaque année pour suivre ce cours. Mais rendu à une retraite avancée, la formule en salle de cours devenait de plus en plus lourde. Nous avons donc opté pour la formation à distance. Quel plaisir! Notre première expérience à l'automne 2015 fut concluante et nous avons eu d'excellents commentaires de nos étudiants pour lesquels cette formule présente d'énormes avantages en dépit de quelques inconvénients. Yves sait très bien gérer cette nouvelle technologie didactique et assure l'entretien d'un blogue que les étudiants partagent entre eux avec aisance. Un des beaux côtés pour eux, c'est de pouvoir reprendre le visionnement de chaque module au besoin surtout lors de la préparation pour les évaluations. Pour les professeurs, il est intéressant de corriger des évaluations dactylographiées plutôt que de déchiffrer les écrits manuels souvent difficiles à lire. Cette première expérience fut nettement concluante et nous poursuivons sur cet élan avec 50-70 étudiants annuellement. Dommage que très peu d'étudiants proviennent de la Faculté d'agriculture!

Chapitre 10

LA CONCLUSION D'UNE BELLE HISTOIRE

Mes années-lumière

J'ai choisi cette rubrique pour deux raisons. Pour moi, les années 2015-2017 ont constitué une période où mes idées, plus que jamais, ont été reçues par un vaste public. On n'allume pas la lampe pour la mettre sous le boisseau! J'estime qu'un scientifique ne rend pas justice à la société s'il ne se préoccupe pas ou n'arrive pas à expliquer ce qu'il a réalisé avec le privilège qu'il a reçu de pouvoir conduire une carrière de recherche universitaire. Ce qu'il m'arrive en fin de carrière remplit exactement cette obligation et c'est grâce aux médias que je peux le constater.

L'autre raison, c'est que l'émission d'ICI Première, *Les Années lumière*, a lancé le bal à la fin de 2015 en recevant Salma Taktek non pas au doc postdoc, mais plutôt pour une interview individuelle. Cela s'est passé avant que *Québec Science* ne publie ses dix découvertes de l'année pour 2015.

La découverte de l'année 2015 de *Québec Science*

Dans son numéro de janvier-février 2016, *Québec Science* annonce que le travail de thèse de Salma Taktek a été non seulement retenu comme une de ses dix découvertes de l'année, mais de plus a reçu le prix du public. Reprise en rafale pendant des semaines par le Canal Savoir, cette nouvelle a rejoint un très vaste public, notre science sortant ainsi du laboratoire.

En juin-juillet, avec la photo de la remise officielle de la reconnaissance, *Québec Science* a produit un numéro en partie axé sur la mycologie, où on m'a interviewé sous le titre de Passionné des champignons, tout en présentant divers thèmes en mycologie. Merci à *Québec Science* et à ses journalistes.

La Semaine verte

Depuis août 2015, La Semaine verte préparait une émission sur le thème des mycorhizes et c'est en janvier 2017 qu'elle fut diffusée pour la première fois. Quelle présentation superbe faisant voir les travaux de Manic 5 sur le retour de la végétation avec plantations d'aulnes fixateurs d'azote sur une assise rocailleuse et sans aucune addition de fertilisant. Une première démonstration de notre nouveau paradigme sur la fertilité et la nutrition des arbres. Une autre partie de l'émission a porté sur l'intérêt de l'inoculation mycorhizienne en agriculture avec des témoignages d'agriculteurs sur le terrain. C'est dire que le message a non seulement rencontré un public amateur de science, mais également les utilisateurs des résultats de nos recherches. On peut conclure en quelque sorte que les agriculteurs sont devenus des collaborateurs dont les expériences dans les champs viennent corroborer ce dont nous rêvions depuis plus de 40 ans. L'application des mycorhizes aux champs a pris son envol. Cette émission, me dit-on, aurait été visionnée par près de 1,5 million de téléspectateurs au Canada. Et ce n'est pas tout, car elle a été retransmise sur TV5 Monde, avec un public potentiel de 100 millions de téléspectateurs.

J'en ai reçu de nombreux échos, notamment venant d'Afrique francophone, m'invitant à aller les aider à démarrer leurs travaux aux champs. On verra comment mon ami Aziz m'a orienté vers le Sénégal.

Un colloque à la Faculté d'agriculture en janvier 2016

Pendant de nombreuses années, j'ai déploré et je déplore toujours que le monde agronomique québécois continue à considérer les mycorhizes comme ayant peu ou pas d'intérêt du tout, pour l'utilisation des mycorhizes dans les cultures, grandes et petites.

Devant ces événements et en particulier la reconnaissance du travail de Salma Tatkek, j'ai rencontré le doyen de la Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation de l'Université Laval, M. Jean-Claude Dufour, qui fut facilement convaincu de l'intérêt de faire un mini-colloque pour souligner la reconnaissance du travail d'une étudiante de sa Faculté, sous la direction du professeur Hani Antoun. En moins de deux, ce fut fait et dès le 29 janvier, nous avons tenu la présentation à guichet fermé, la salle étant bondée au maximum de sa capacité avec 180 participants. J'ai senti à ce moment le vent tourner, présage d'un intérêt accru du monde agronomique pour l'utilisation des mycorhizes en agriculture, mais la suite demeure toujours la même au moment de publier ce volume. Seul bémol: peu de professeurs de cette faculté ont assisté à l'événement.

Le CRAAQ

M'étant interrogé sur les moyens que je devrais prendre pour atteindre le monde agronomique, j'ai identifié le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Ayant repéré les bureaux de cet organisme, je me suis demandé si je devais m'y rendre. Ayant été souvent rabroué par des agronomes, j'étais sceptique sur ce qu'une visite pourrait apporter au débat.

Un bon matin, je décide de me rendre à ce bureau tout plein de questionnement sur la façon dont je serai reçu. La porte de l'ascenseur s'ouvre, je repère les lieux et je

m'approche timidement du bureau d'accueil... pour entendre la réceptionniste me dire: «Je vous connais, je vous ai vu à La Semaine verte!» Ouf! Une première étape franchie avec succès. Je demande alors si je pourrais rencontrer quelqu'un pour parler mycorhizes. Attendez, M. Guillaume Breton, directeur adjoint, vous recevra.

J'explique donc ma démarche en racontant comment je m'étais interrogé avant d'affronter le monde agronomique. Il me rassure immédiatement en me disant qu'il est biologiste tout comme le directeur. Ouf! J'étais en territoire ami.

Guillaume m'a expliqué sommairement le fonctionnement du CRAAQ en attirant mon attention sur les blogs Agri réseau. Et c'est ainsi que je suis devenu blogueur à l'automne 2016. J'ai produit de courts billets portant d'abord sur la biologie et l'écologie des mycorhizes, en passant par la production et l'application des mycorhizes en horticulture et grandes cultures, sur les effets et l'intérêt de ces inoculations en agriculture durable, etc.

À deux reprises, on m'a assuré que ces billets étaient très largement consultés. Pourtant, une fois cette série terminée, le «pape de la fertilisation» au Québec a envoyé un pavé dans la mare, disant aux agriculteurs à propos des mycorhizes: «On ne vous vend que du vent!» La claque en pleine face.

Mycorhizes et sécurité alimentaire mondiale

L'expérience vécue avec mon ami Alok en Inde constitue une preuve tangible de cette affirmation. La biotechnologie développée à la fin des années 1980 et au début de 1990 dans mes laboratoires de l'Université Laval et de Montréal se traduit aujourd'hui par l'utilisation de l'inoculation industrielle sur quelque 1,4 million d'hectares dans ce pays, en abandonnant pratiquement l'utilisation des superphosphates. Avec une teneur moyenne des sols de 35 ppm de

phosphore soluble, on arrive à faire pousser la presque totalité des cultures, incluant le blé dans des endroits où on ne l'a jamais fait croître.

Au printemps 2018, Abdoul Aziz Saal, un Sénégalais, m'appelle en me disant: «Votre affaire de mycorhizes, c'est le projet de ma vie. J'aimerais vous rencontrer. Évidemment, je lui ai ouvert ma porte toute grande!»

Il m'apprend qu'après ses études à l'ENAP, il en est devenu professeur avec la tâche d'effectuer des formations en gestion du changement dans les administrations publiques, centrées sur les pays francophones d'Afrique. Il m'explique que, né dans une famille dont le père est agriculteur avec beaucoup d'influence dans la région, il possède lui-même des superficies agricoles. Sérieux dans sa démarche, il conclut une entente avec l'ENAP pour travailler à mi-temps, continuer ses formations en Afrique et lancer progressivement son entreprise sur les mycorhizes. Je le mets en contact avec le responsable de la distribution des inoculum chez Premier Tech. Celui-ci est prêt à expédier des inoculum pour ses premières expériences, à condition d'avoir un permis formel d'importation. Ce qui fut fait en deux temps trois mouvements. Il a donc utilisé les inoculum de PremierTech pour une première fois. Les résultats sont à venir. Il m'a réitéré qu'il s'agit toujours du projet de sa vie. C'est à suivre! Je ne doute pas que tous les pays d'Afrique profiteront des mycorhizes pour assurer leur sécurité alimentaire. Aziz, un professeur sur la gestion des changements dans les fonctions publiques, est la personne toute désignée pour réaliser ce projet.

Finalement, au risque de me répéter, j'aimerais citer le ministre de la Science et de la Technologie de l'Inde, lors de la Conférence internationale sur les mycorhizes en 2013 à Delhi: «Ce que vous faites est vital pour l'Inde et le deviendra pour l'humanité!»

Le chemin d'un biologiste

C'est son milieu familial qui a donné le goût de la nature à J. André Fortin à un âge très précoce. Élevé dans le quartier Montcalm à Québec, il avait un accès quotidien au magnifique Parc des champs de bataille, les Plaines d'Abraham. La vue du haut de ce promontoire le faisait rêver à des voyages là-bas dans les montagnes à perte de vue, ou sur le fleuve Saint-Laurent omniprésent. C'était une formidable fenêtre sur la nature.

Les pique-niques et en particulier les longues marches dans les sous-bois avec son père devaient prendre une tournure inattendue. Les graines de noyers noirs et cendrés, de marrons d'Inde et de chênes qu'il y a semées sont devenues, quelque 70 ans plus tard, une partie des grands arbres qu'on peut admirer aujourd'hui.

Une tante lui a fait découvrir le merveilleux monde des champignons.

C'est ainsi qu'est né l'amour de la biologie qui devait guider sa formation et sa vie entière.

Pionnier de la recherche en biologie végétale, innovateur et pédagogue passionné, fondateur de deux centres de recherche reconnus, champion de l'utilisation des mycorhizes dans le domaine agricole et vulgarisateur infatigable, J. André Fortin a de quoi inspirer les jeunes d'aujourd'hui. En décrivant dans ce livre son parcours inédit, il leur montre le chemin de la découverte et d'une vie particulièrement épanouissante.

