



RAPPORT FINAL

Numéro de projet : AF-12-203

**Développement d'un outil bioclimatique de prévision des
émergences des champignons à potentiel commercial**

Code du projet : PART2012A034


Présenté au

**Programme d'aide à la recherche
et au transfert - Volet technologique (PART)**

De

Biopterre - Centre de développement des bioproduits
1642, rue de la Ferme
La Pocatière (Québec) G0R 1Z0

Octobre 2013



Équipe de réalisation
Biopterre – Centre de développement
des bioproduits

Chargé de projets

M. Maxim Tardif

Professionnelle de recherche

Mme Myriam Lambany

Conseillers scientifiques

M. Guy Langlais (professeur ITA)

Mme Catherine Ladouceur (professeur Cégep)

Techniciens

Mme Marie-Claude Gagnon

M. Pierre Bouchard

Résumé

Code du projet : **PART2012A034**

Titre : Développement d'un outil bioclimatique de prévision des émergences des champignons à potentiel commercial

Par : Maxim Tardif, Myriam Lambany, Guy Langlais, Catherine Ladouceur, Marie-Claude Gagnon, Pierre Bouchard

Établissement d'enseignement: Cégep de La Pocatière

CCTT : Biopterre - Centre de développement des bioproduits

Durée : 10 mois – prolongation : plus 6 mois

Résumé : Le projet de recherche appliquée « *Développement d'un outil bioclimatique de prévision des émergences des champignons à potentiel commercial* » s'intéresse à la problématique liée au caractère éphémère et irrégulier de l'apparition des champignons forestiers, notamment le Bolet cèpe (*Boletus edulis*), dont la valeur commerciale est intéressante. Sa courte durée de vie et la variabilité des émergences en fonction des facteurs environnementaux représentent effectivement des difficultés majeures auxquelles sont confrontées les entreprises qui cherchent à localiser et récolter celui-ci dans son habitat naturel.

Le présent projet a permis, dans un premier temps, de caractériser les habitats dans lesquels les bolets cèpes sont abondants; il s'agit de plantations d'épinettes blanches et/ou de Norvège dont la surface terrière est élevée et dont le sol est un loam sablonneux au pH faible. Un suivi rapproché des champignons dans 6 sites expérimentaux nous a par ailleurs permis de mettre en relation les conditions environnementales du milieu et les émergences de sporophores. Les principaux résultats nous laissent croire que l'humidité du sol et les écarts journaliers de températures ambiantes, appelés *chocs thermiques*, sont des variables qui ont une influence marquée sur les émergences du bolet cèpe. Cet aspect a été défini comme étant une chute d'environ 5 degrés Celsius de la température moyenne jours-nuit sur une période de moins de 72 heures, et où la courbe des températures de l'air rejoint celle de la température moyenne du sol (environ 13 degrés Celsius) et dans des conditions d'humidité du sol de plus de 52 % (moyenne de 55 %). Ces conditions doivent aussi être accompagnées d'une humidité du sol au-dessus de 52 %, avec une moyenne de 55 %.

Finalement, l'intégration des paramètres bioclimatiques dans un outil de prévision des émergences nous a permis d'établir des modèles de prédictions basés sur un système de pointage, qui s'approchent grandement des émergences réelles observées. L'intégration du paramètre « choc thermique » dans le modèle présente par ailleurs des résultats prometteurs. L'outil bioclimatique permettra, entre autres, de limiter les dépenses dues au parcours plus ou moins hasardeux de recherches faites sur le terrain et pourra éventuellement être bonifié avec davantage de données réparties dans le temps, qui nous donneront une indication de la variabilité interannuelle des émergences de champignons.

Table des matières

1. Introduction	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Contexte forestier.....	1
1.3 L'espèce cible : le Bolet cèpe	2
1.4 Hypothèse et objectifs.....	3
2. Méthodologie	4
2.1 Les sites d'étude	4
2.1.1 Saison 2012	4
2.1.2 Saison 2013	4
2.2 Mise en place des parcelles et prises de données.....	5
2.2.1 Mise en place des parcelles et caractérisation des sites d'étude	5
2.2.2 Suivi de <i>Boletus edulis</i> et prise des données météorologiques	6
2.3 Analyses statistiques	7
3. Résultats et discussion.....	9
3.1 Caractéristiques des sites productifs	10
3.2 Conditions environnementales.....	10
3.2.1 Température et humidité (2012).....	10
3.2.2 Température et humidité (2013).....	12
3.2.3 Autres paramètres environnementaux (2011)	20
3.3 Développement d'un outil bioclimatique	21
4. Conclusion.....	27
Références.....	31
Annexe 1 : Caractérisation des sites d'étude	33
Annexe 2 : Fiche de visite d'un site d'étude de <i>B. edulis</i> – Projet AF-12-203	39

Liste des tableaux

Tableau 1: Corrélations de Spearman réalisées entre les émergences de <i>Boletus edulis</i> et les variables environnementales mesurées dans les différentes parcelles d'étude. Entre parenthèses, la valeur de p pour chacune des corrélations	12
Tableau 2: Valeurs des corrélations de Spearman et valeurs de p du modèle linéaire mixte entre les variables environnementales avec pseudoréplication pour chaque section de 10 m et les abondances de <i>Boletus edulis</i> en 2011. En gras : données significatives ($p < 0,005$	20
Tableau 3: Valeur des corrélations de Spearman et valeurs de p des facteurs fixes inclus dans le modèle linéaire simple mettant en relation les abondances de <i>Boletus edulis</i> et les variables environnementales sans pseudoréplication.....	21

Liste des figures

Figure 1: <i>Boletus edulis</i>	2
Figure 2: Parcelles d'étude échantillonnées sur le territoire du Bas-Saint-Laurent et de Chaudière-Appalaches : en jaune, les parcelles échantillonnées en 2012 uniquement, en rouge, les parcelles échantillonnées en 2012 et 2013 et en vert les parcelles échantillonnées en 2013 uniquement.....	5
Figure 3: Courbe de la température du sol, de la température ambiante, de l'humidité relative, de l'humidité du sol entre le 19 et le 26 août 2012, à la Parcelle 1 de Saint-Bruno-de-Kamouraska. En vert, l'abondance de <i>Boletus edulis</i>	11
Figure 4: Courbe de la température du sol, de la température ambiante, de l'humidité relative et de l'humidité du sol entre le 19 et le 26 août 2012, à la Parcelle 2 de Saint-Bruno-de-Kamouraska. En vert, l'abondance de <i>Boletus edulis</i>	11
Figure 5: a) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observé à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle La Pocatière et courbes de température du sol, de température ambiante et d'écart journalier de température, en degrés Celsius. b) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle La Pocatière et courbes d'humidité du sol (%) et de pluviométrie (mm)	15
Figure 6: a) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 3 et courbes de température du sol, de température ambiante et d'écart journalier de température, en degrés Celsius. b) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 3 et courbes d'humidité du sol (%) et de pluviométrie (mm)	16
Figure 7: a) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 2 et courbes de température du sol, de température ambiante et d'écart journalier de température, en degrés Celsius. b) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 2 et courbes d'humidité du sol (%) et de pluviométrie (mm)	17
Figure 8: a) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Pourvoirie et courbes de température du sol, de température ambiante et d'écart journalier de température, en degrés Celsius. b) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Pourvoirie et courbes d'humidité du sol (%) et de pluviométrie (mm)	18
Figure 9: a) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 1 et courbes de température du sol, de température ambiante et d'écart journalier de température, en degrés Celsius. b) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 1 et courbes d'humidité du sol (%) et de pluviométrie (mm)	19
Figure 10: Probabilité d'émergence des sporophores de <i>Boletus edulis</i> , selon l'outil développé (modèle 1). a) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observés à la Parcelle La Pocatière au cours de la saison d'échantillonnage de 2013. b) Probabilité d'émergence des bolets selon l'outil bioclimatique, selon le modèle basé sur les températures et humidité du sol optimales	22
Figure 11: Probabilité d'émergence des sporophores de <i>Boletus edulis</i> , selon l'outil développé (modèle 2). a) Nombre de sporophores de <i>Boletus edulis</i> observés à la Parcelle La Pocatière au cours de la saison d'échantillonnage de 2013. b) Probabilité d'émergence des bolets selon l'outil bioclimatique, selon le modèle basé sur le choc thermique	24

1. Introduction

1.1 Mise en contexte

Les champignons forestiers comestibles à potentiel commercial constituent une ressource méconnue et peu exploitée au Québec. L'émergence de ce secteur d'activité est pourtant bien dynamique et constitue une avenue prometteuse vers la diversification des ressources forestières exploitées, pouvant stimuler l'économie des régions touchées par la crise forestière qui sévit depuis déjà plusieurs années au Québec (Lamérant *et al.* 2008; CREBSL 2010; MRNF 2008). La Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier, adoptée en 2010, encourage d'ailleurs un aménagement écosystémique et une gestion intégrée des ressources forestières, et contribue en ce sens au développement de la filière des champignons au Québec (MRNF 2009).

Les champignons forestiers présentent effectivement un potentiel économique non négligeable; d'après J.-André Fortin, Ph. D., professeur associé au Centre de recherche en biologie forestière de l'Université Laval, le commerce mondial pour cette ressource a été estimé à plus de 2,5 milliards de dollars (Biopterre 2009).

À ce jour, des difficultés importantes sont toutefois rencontrées par les entreprises et les communautés souhaitant développer cette filière. Notons, d'une part, la difficulté de localiser les sites productifs sur un vaste territoire et, d'autre part, le caractère éphémère de certaines espèces, n'allouant qu'une très courte fenêtre de temps pour la récolte.

1.2 Contexte forestier

Le contexte forestier du Bas-Saint-Laurent et de Chaudière-Appalaches se caractérise par une abondance de plantations d'épinettes, qui s'explique notamment par la dernière épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) (*Choristoneura fumiferana*), qui a perduré de 1971 à 1992, et qui s'est traduite par d'importantes coupes de récupération et de prévention du couvert forestier à prédominance de sapin baumier (*Abies balsamea*) (Pominville *et al.* 1999). La plantation d'arbres non hôtes de la TBE s'est alors avérée la stratégie optimale afin de rebâtir le capital forestier perdu; aujourd'hui, la moitié du territoire forestier du Bas-Saint-Laurent est occupée par des peuplements de moins de 40 ans, dont 60 % sont des plantations, majoritairement d'épinettes (Müssenberger 2007).

Par ailleurs, les plantations d'épinettes sont reconnues pour posséder une bonne productivité de champignons; plus de 75 kg/ha d'espèces comestibles ont été cueillis dans des plantations d'épinettes blanches (*Picea glauca*) du Lac-Saint-Jean (Gévry 2010). Des inventaires entrepris dans des plantations d'épinettes blanches et d'épinettes de Norvège (*Picea abies*) du Bas-Saint-Laurent ont quant à eux permis de recenser des quantités variant de 10 à 50 kg/ha pour le Bolet cèpe (*Boletus edulis*) (Biopterre 2009).

Les champignons sont des organismes qui obéissent rapidement aux conditions environnementales, celles-ci influençant leur développement et leur abondance. Cette particularité, ajoutée au fait que la vie des sporophores est de très courte durée (de quelques jours à quelques semaines), représente des difficultés majeures auxquelles sont confrontées les entreprises et collectivités oeuvrant au développement de la filière commerciale des champignons forestiers.

Le projet actuel de recherche appliquée s'intéresse à la problématique liée au caractère éphémère et erratique des champignons forestiers. Le projet vise à développer un outil bioclimatique de prévision des émergences des champignons forestiers à potentiel commercial.

1.3 L'espèce cible : le Bolet cèpe

Le Bolet cèpe (*Boletus edulis*) est un champignon ectomycorhizien robuste avec chapeau convexe mesurant de 6 à 20 cm de diamètre à maturité, d'un brun rougeâtre. Son pied, ferme et renflé à la base, mesure de 10 à 18 cm. On le retrouve isolé ou grégaire, sous les conifères, en bordure de boisés et parfois dans les clairières. Sa récolte s'effectue de la fin juin jusqu'à septembre. Sa fructification est rapide suite à des changements d'humidité et de température (Gévry 2008). Le cèpe est parmi les champignons les plus appréciés des consommateurs et des restaurateurs (Lamérant *et al.* 2008) et le plus récolté après la Chanterelle commune (Biopterre 2009). La valeur de ce champignon, dont plusieurs dizaines de milliers de tonnes sont consommées dans le monde chaque année (Hall 2003) était évaluée, en 2003, à près de 250 millions de dollars canadiens (Duchesne 2004).



Figure 1: *Boletus edulis*
Source : fotoplatforma.pl

Le Bolet cèpe est utilisé uniquement en alimentation, bien que certains consommateurs d'origine chinoise l'utilisent dans la pharmacopée (Lamérant *et al.* 2008). Le cèpe est très souvent parasité, ce qui entraîne des variations du prix du produit selon la qualité des spécimens récoltés (Lamérant *et al.* 2008). Afin de pouvoir récolter des sporophores de bonne qualité, il importe donc de bien connaître le cycle du champignon et les conditions qui entraînent sa fructification.

1.4 Hypothèse et objectifs

L'hypothèse à vérifier par la réalisation de ce projet est à l'effet qu'il est possible d'associer avec précision des conditions bioclimatiques au développement phénologique d'espèces de champignons ectomycorhiziens, dont fait partie le Bolet cèpe, en vue de prévoir en temps et en lieu les émergences des espèces recherchées. L'application d'un tel outil permettra, entre autres, de diminuer les coûts associés à la recherche des sites de récolte sur le terrain, de récolter les champignons au stade de valeur commerciale élevée et de limiter le parasitisme. L'outil sera constitué d'une base de données intégrant les paramètres biologiques et climatiques qui influencent le développement phénologique du Bolet cèpe. Le traitement de ces données permettra d'établir des prédictions en termes d'émergence de champignons.

Objectifs :

- Objectif 1 : Préciser les caractéristiques biologiques et physicochimiques des sites où abondent les bolets cèpes.
- Objectif 2 : Préciser les paramètres bioclimatiques qui influencent le développement phénologique du Bolet cèpe. Il s'agit de déterminer les conditions nécessaires pour le développement du primordium et de la fructification de *Boletus edulis* dans les forêts et les plantations d'épinettes blanches (*Picea glauca*) et de Norvège (*Picea abies*).
- Objectif 3 : Établir une corrélation précise entre les stades de développement des sporophores de Bolet cèpe et les paramètres bioclimatiques influents.
- Objectif 4 : Développer une base de données dans laquelle seront intégrées les informations qui permettront de prévoir l'émergence des champignons en temps et en lieu.

2. Méthodologie

2.1 *Les sites d'étude*

2.1.1 Saison 2012

Par contrainte matérielle et budgétaire et parce que la fréquence des visites devait être élevée, trois sites ont été retenus pour la portion de l'étude réalisée en 2012. Deux de ces sites faisaient partie du projet de recherche de Mme Myriam Drolet-Lambany dans le cadre de sa maîtrise ayant pour sujet « Les effets de l'éclaircie commerciale dans les plantations d'épinettes sur la productivité des champignons forestiers comestibles. », en 2011 (Lambany 2012) (Figure 2). Les deux peuplements retenus ici s'avèrent être parmi les plus productifs en ce qui a trait au Bolet cèpe, parmi les 57 parcelles établies en 2011. Le premier est une plantation d'épinettes de Norvège de 35 ans, située à Saint-Bruno-de-Kamouraska (Parcelle Saint-Bruno 1). Le second se trouve à Saint-Adalbert, dans le comté de L'Islet, et est composé d'épinettes de Norvège âgées de 32 ans (Parcelle Saint-Adalbert). La troisième plantation se trouve sur le territoire de Sainte-Anne-de-la-Pocatière (Parcelle La Pocatière). Bien que n'ayant pas été échantillonnée au cours de l'été 2011, son abondance de champignons a été observée par de nombreux cueilleurs qui la fréquentent depuis plusieurs années. Il s'agit d'une plantation d'épinettes de Norvège couvrant 1,12 hectare, âgée de 35 ans.

2.1.2 Saison 2013

En 2013, la reconduction du projet nous a permis d'échantillonner davantage de parcelles, pour un total de 5, dont 2 avaient été suivies en 2012 (La Pocatière et Saint-Bruno 1). Trois nouvelles parcelles, situées sur le territoire de Saint-Bruno-de-Kamouraska, ont été visitées au cours de la saison (Parcelles Saint-Bruno 2 et 3, Parcelle Pourvoirie), suite à la confirmation des propriétaires et de cueilleurs de la présence de bolets dans ces secteurs (Figure 2). Il s'agit, dans tous les cas, de plantations matures d'épinettes blanches et/ou de Norvège. Pour des raisons de distance et vue l'absence de bolets en 2012 à la Parcelle de Saint-Adalbert, cette dernière a été retirée des sites suivis en 2013.

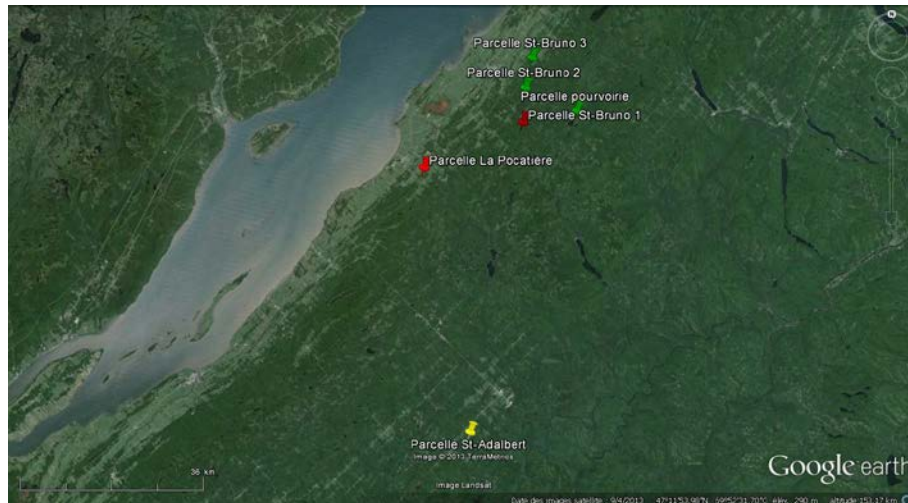


Figure 2: Parcelles d'étude échantillonnées sur le territoire du Bas-Saint-Laurent et de Chaudière-Appalaches : en jaune, les parcelles échantillonnées en 2012 uniquement, en rouge, les parcelles échantillonnées en 2012 et 2013 et en vert les parcelles échantillonnées en 2013 uniquement

2.2 *Mise en place des parcelles et prises de données*

2.2.1 **Mise en place des parcelles et caractérisation des sites d'étude**

Deux parcelles d'étude, d'une largeur de 4 mètres et d'une longueur de 20 mètres, ont été établies dans les plantations sélectionnées. Afin de caractériser le site d'étude, plusieurs variables environnementales ont été mesurées dans une parcelle d'échantillonnage, située à mi-chemin entre les deux parcelles d'étude. L'installation de cette parcelle supplémentaire a permis de limiter le piétinement et la perturbation du sol dans les parcelles suivies pour les émergences de bolets. Un échantillon de sol y a été prélevé afin de déterminer le pH du sol, ainsi que la texture (% limon, sable et argile). En 2012, la teneur en éléments nutritifs disponibles dans le sol a aussi été analysée. Comme ce facteur ne s'est pas révélé significatif pour la production de sporophores, il n'a pas été pris en compte en 2013. Un consigneur de température de type « iButton » a aussi été installé de façon permanente dans chaque peuplement, enfoui à 10 cm dans le sol, afin de déterminer la température du sol. Les thermomètres ont préalablement été programmés pour enregistrer une valeur aux deux heures, durant toute la saison d'échantillonnage. La radiation photosynthétiquement active au sein du peuplement a été mesurée à l'aide d'un capteur BF5, nous indiquant la quantité de lumière disponible pour la croissance des végétaux sur le site. La pente, mesurée à l'aide d'un clinomètre, ainsi que le recouvrement du sol forestier (tranches de 5 %) par les débris ligneux et les plantes herbacées, ont été notés. Les espèces retrouvées dans les différentes strates de végétation ont été identifiées

au niveau le plus précis possible, *in situ*. La surface terrière et la densité spécifique au sein des plantations étudiées ont pu être déterminées à l'aide des mesures de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des arbres considérés par un prisme (coefficient de 2), à chaque parcelle d'échantillonnage. L'humidité ambiante a été enregistrée par un Datalogger de type Lascar electronics Inc., modèle EL-USB-1 en 2012; toutefois, vu les faibles variations d'humidité ambiante observées, et étant donné sa forte corrélation avec l'humidité du sol, cette variable n'a pas été considérée dans la prise de données de 2013. Finalement, c'est aussi à la parcelle d'échantillonnage qu'a été mesurée, à chaque visite, l'humidité du sol. En 2012, l'humidité a été mesurée à l'aide de tensiomètre de type Hortau, modèle TX-80-WL. En 2013, afin d'obtenir des valeurs plus précises, une sonde de type Aquaterr EC-300 a été préférée au tensiomètre.

2.2.2 Suivi de *Boletus edulis* et prise des données météorologiques

En 2012, les sites ont été visités deux fois par semaine en matinée, lorsque les précipitations étaient nulles ou peu abondantes (5 mm et moins). Lorsque des émergences de champignons ont été observées, ou alors lorsque survenait une pluie abondante (5 mm et plus), des visites ont été réalisées quotidiennement pendant 5 jours consécutifs. Cette stratégie d'échantillonnage a été appliquée afin d'optimiser le nombre de visites sur le terrain, en sachant que les émergences surviennent généralement après une pluie abondante. Le suivi des parcelles a été effectué du début du mois de juillet jusqu'au début du mois de septembre. En 2013 toutefois, afin de faire un suivi plus rapproché de la ressource et d'être témoins de la totalité des émergences de bolets, les parcelles ont été visitées quotidiennement entre le 26 juin et le 22 août.

Les bolets retrouvés à l'extérieur des parcelles d'étude ont été dénombrés et classés dans différentes catégories selon le diamètre de leur chapeau sans toutefois faire l'objet d'un suivi rapproché.

- aa (2 cm et moins);
- A (3 à 4 cm);
- B (5 à 6 cm);
- C (7 cm et plus)

Une fois dénombrés, ces derniers ont été cueillis, afin d'éviter d'être dénombrés à nouveau. Pour l'ensemble des analyses statistiques, seuls les spécimens de calibre aa et A ont été conservés pour assurer avec plus de précision la période d'apparition des sporophores. Ces diamètres de chapeau correspondent aux spécimens de bolets commercialisables. Les bolets retrouvés à

l'intérieur des parcelles ont été dénombrés, puis identifiés à l'aide d'un piquet gradué, sur lequel a été indiqué un numéro correspondant spécifiquement à des spécimens distincts. La hauteur du bolet de même que le diamètre de son chapeau (échelle de aa à C) ont été mesurés. Finalement, afin de faire un suivi approprié et de pouvoir observer l'évolution de la fructification, les spécimens ont été photographiés quotidiennement.

2.3 Analyses statistiques

En 2012, étant donné qu'une seule parcelle a produit des sporophores, et en très faible quantité, il nous a été impossible de réaliser des analyses statistiques poussées avec les données recueillies. Les statistiques résultant de cette année sont conséquemment descriptives. Dans un premier temps, un tableau révélant les caractéristiques physiques de chacun des peuplements étudiés a été réalisé (Annexe 1). Un graphique a par la suite été réalisé pour chacune des parcelles productives (Saint-Bruno 1), où des sporophores de *Boletus edulis* ont été observés : ces figures illustrent les variations de la température ambiante, de la température du sol, de l'humidité ambiante et l'humidité du sol et de la pluviométrie au cours de la saison d'échantillonnage. À ces courbes de variables environnementales ont été superposées des histogrammes illustrant les abondances de fructifications observées. Les mêmes statistiques descriptives ont été réalisées avec les données récoltées en 2013; comme les émergences ont été plus nombreuses en 2013, deux graphiques distincts ont été produits (l'un incluant les températures du sol, de l'air et les écarts journaliers de température, l'autre incluant l'humidité et la pluviométrie) afin de mieux visualiser la répartition des sporophores dans le temps.

En complément, avec les données de 2011 (Lambany, 2012), des modèles linéaires ont été établis afin de préciser les impacts des variables environnementales sur la productivité de *Boletus edulis*. Deux modèles linéaires distincts ont dû être réalisés, selon l'échelle spatiale à laquelle les données ont été récoltées.

Modèle 1 : Abondance *Boletus edulis* ~ Débris ligneux + Recouvrement
Herbacées + Pente + (1|Parcelle)

Modèle 2 : Abondance *Boletus edulis* ~ Âge + Surface terrière
+ pH + PAR + Texture + Température du sol

Les données de 2011 et de 2013 nous ont permis de réaliser plusieurs corrélations de Spearman afin de révéler le sens et la significativité de la relation entre les abondances de bolets et les variables environnementales sélectionnées.

Finally, the data collected in 2013 were integrated into a bioclimatic tool that was developed, within the framework of this project, in order to predict the emergence dates of mushroom truffles, according to the environmental conditions observed. The tool was inspired by the CIPRA software (Agriculture and Agri-Food Canada 2004), developed by Agriculture and Agri-Food Canada. The model was conceived from a scoring system and conditions, specifying the optimal temperatures and soil humidity for the emergence of the mushroom.

The entire statistical analysis was carried out using the R and Excel software.

3. Résultats et discussion

La productivité des champignons forestiers a été très faible au cours de l'été et de l'automne 2012 : des trois parcelles expérimentales installées sur le territoire de Kamouraska et de L'Islet, seule celle de Saint-Bruno a produit des bolets cèpes, et en très faible quantité. Les conditions météorologiques, auxquelles les champignons sont particulièrement sensibles, ont été extrêmes au cours de l'été et de l'automne 2012 et ont pu partiellement expliquer la faible abondance de champignons. Au niveau des précipitations, le Canada atlantique, dont fait partie la province de Québec, a connu un été extrêmement sec, soit de 22 % au-dessous de la normale (Environnement Canada 2012). Or, il existe une corrélation positive entre les précipitations et la production de sporophores (Eveling *et al.* 1990 ; Pinna *et al.* 2010; O'Dell 1999), l'abondance et la richesse spécifique des champignons ectomycorhiziens pouvant être partiellement expliquées par un gradient d'humidité (O'Dell 1999). Cette même région a vu sa température moyenne augmentée de 1,6 degré Celsius au-dessus de la normale saisonnière, ce qui en a fait l'été le plus chaud observé depuis 1948, aggravant l'état de sécheresse des sols. Selon Hall *et al.* (1998), la fructification de la variété européenne de *Boletus edulis* peut être littéralement inhibée lors d'étés très secs. En conséquence, peu de conclusions peuvent être tirées à partir de la base de données résultant de la saison 2012. Au total, seulement trois bolets cèpes ont émergé dans la première parcelle de Saint-Bruno 1 entre le 20 et le 26 août, et 5 sporophores ont été dénombrés dans la deuxième parcelle au cours de la même période. Malgré la faible production de 2012, des tendances intéressantes ont pu être observées avec les champignons récoltés (Figures 3 et 4). Les données plus abondantes récoltées en 2011 et en 2013, alors que les précipitations annuelles oscillaient autour de la normale saisonnière, ont par ailleurs pu être utilisées afin de déterminer les caractéristiques favorables à l'apparition de bolets cèpes.

En 2013, le site le plus productif a été Saint-Bruno 2, où 17 sporophores de *Boletus edulis* ont été suivis au sein des deux parcelles. À l'opposé, la Parcelle Saint-Bruno 3 n'a quant à elle produit qu'un seul sporophore au cours de la saison. Le suivi quotidien des émergences au sein des parcelles a permis d'établir la durée de vie moyenne d'un sporophore à 2, 3 jours, considérant la durée de vie comme le passage du sporophore du stade aa ou A au stade C, tel que décrit plus haut. Cependant, cette évaluation demeure une estimation très sommaire, car selon les conditions climatiques du moment et le site de croissance, certains spécimens ont été retirés, car ils ont

séché ou pourri avant de se développer. Cette évaluation ne considère pas non plus les parasites colonisant généralement très rapidement les spécimens.

3.1 Caractéristiques des sites productifs

Les peuplements étudiés ont été choisis pour leur productivité intéressante de *Boletus edulis*, qui a été observée dans les dernières années : il s'agit, dans tous les cas, de plantations d'épinettes blanches et/ou de Norvège âgées entre 25 et 35 ans. L'épinette est une essence reconnue pour former des ectomycorhizes avec les bolets (Fortin *et al.* 2008). Les associations mycorhiziennes sont par ailleurs dynamiques, c'est-à-dire que l'arbre s'associera avec différentes espèces de champignons au cours de sa vie; ainsi, à 30-35 ans, les plantations semblent produire une quantité optimale de cèpes. La surface terrière des peuplements choisis est par ailleurs relativement élevée : ces plantations atteignent progressivement la maturité et n'ont pas encore subi d'éclaircie commerciale, de sorte que leur densité est élevée. Les plantations étudiées sont par ailleurs caractérisées par un pH relativement acide (entre 4,1 et 4,9), qui peut être expliqué par la décomposition lente des aiguilles au sol (CRPF 2012). Les sols de ces plantations productives sont des loams-sablonneux, où le sable occupe une proportion supérieure à 50 %. Les caractéristiques détaillées des plantations étudiées sont présentées en Annexe 1.

3.2 Conditions environnementales

3.2.1 Température et humidité (2012)

En 2012, très peu de variation a été observée au niveau de la température du sol, celle-ci s'étant maintenue entre 14,5 et 16,6 degrés Celsius pour la période à laquelle les fructifications ont été observées (entre le 19 et le 26 août). On observe, par ailleurs, une forte corrélation entre la température du sol et de l'air ($\rho=0,826$, $p=1,385 \times 10^{-15}$ pour la Parcelle 1 et $\rho=0,819$, $p < 2,2 \times 10^{-16}$ pour la Parcelle 2). Globalement, l'humidité relative est demeurée stable lors de la période de fructification, oscillant entre 75 % et 87 %. La seule variable ayant présenté une variation considérable est l'humidité du sol qui, telle que présentée dans les Figures 1 et 2, a augmenté considérablement au cours de la période considérée, nous laissant croire que *Boletus edulis* a tendance à fructifier dans des conditions d'humidité élevée du sol. Des résultats similaires ont déjà été notés par Pinna *et al.* (2010) qui ont observé un effet significatif de l'humidité du sol sur la date de fructification des champignons, notamment chez *Boletus edulis*. Pinna *et al.* (2010) ont effectivement suggéré que la température et l'humidité du sol sont les

principaux facteurs influençant la phénologie, mais toutefois sur une échelle interannuelle : les données recueillies en 2012 ne nous permettent donc pas d'arriver à de telles conclusions.

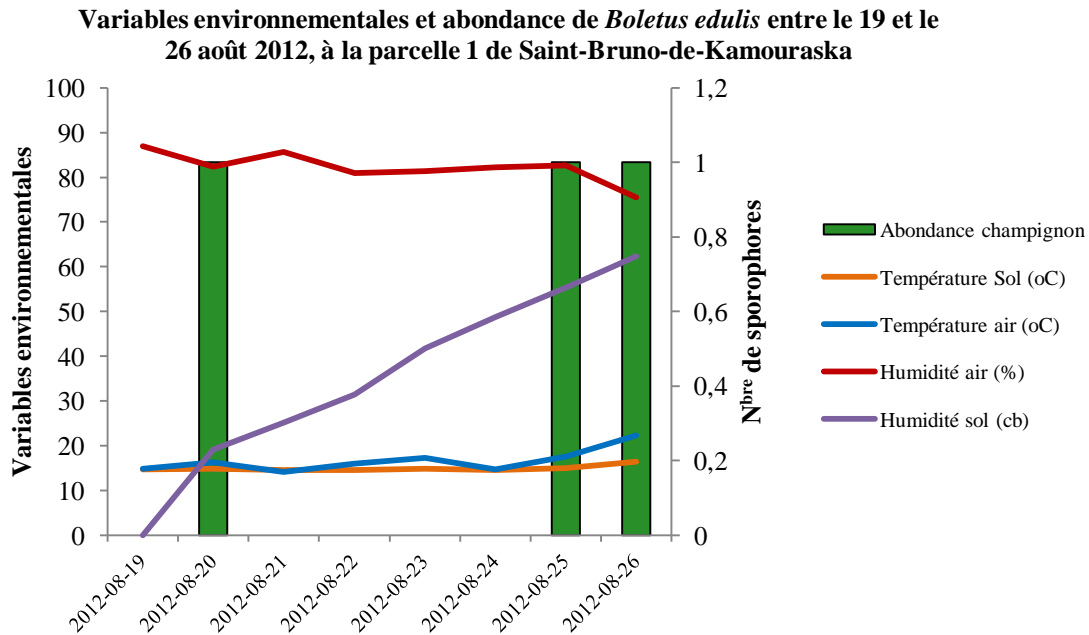


Figure 3: Courbe de la température du sol, de la température ambiante, de l'humidité relative, de l'humidité du sol entre le 19 et le 26 août 2012, à la Parcelle 1 de Saint-Bruno-de-Kamouraska. En vert, l'abondance de *Boletus edulis*

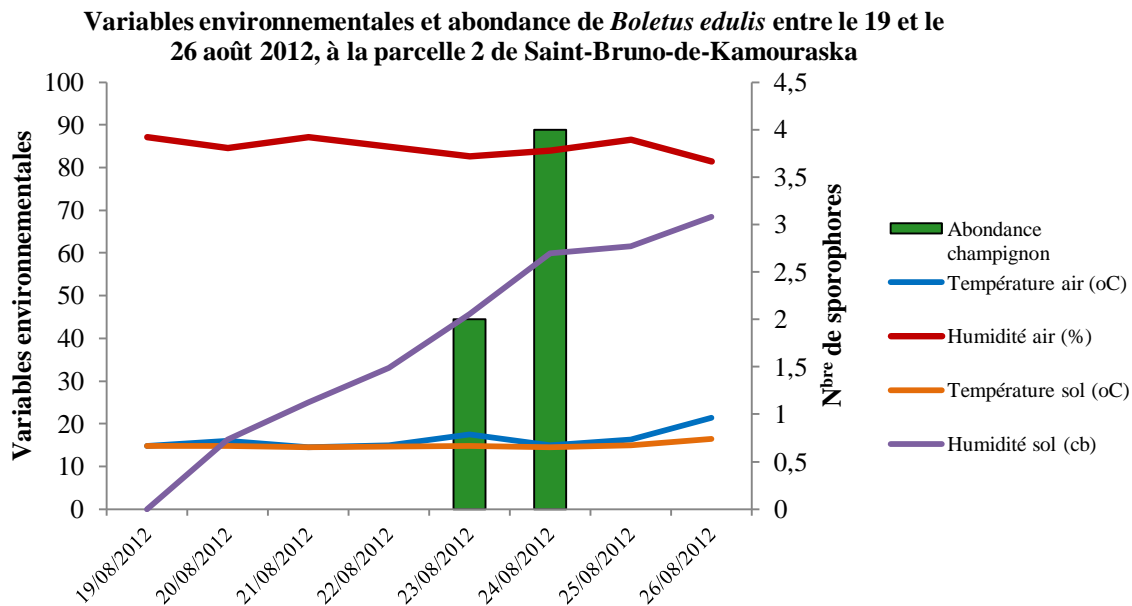


Figure 4: Courbe de la température du sol, de la température ambiante, de l'humidité relative et de l'humidité du sol entre le 19 et le 26 août 2012, à la Parcelle 2 de Saint-Bruno-de-Kamouraska. En vert, l'abondance de *Boletus edulis*

3.2.2 Température et humidité (2013)

La banque de données récoltées en 2013, alors que les émergences ont été abondantes, nous a permis de mettre en relation les variables environnementales mesurées et les émergences de *Boletus edulis* observées. Ainsi, des corrélations de Spearman ont permis d'établir le lien entre le nombre total d'émergences observées (à l'intérieur et à l'extérieur des parcelles d'étude) et la température ambiante, la température du sol, l'humidité du sol, la pluviométrie et l'écart journalier de température. Bien que peu de relations se soient montrées significatives, nous pouvons remarquer que l'humidité du sol a joué un rôle important dans deux des cinq parcelles à l'étude. Le nombre de sporophores observés à la Parcelle La Pocatière a une forte corrélation avec l'humidité du sol ($\rho=0,4836$, $p=0,001$), tout comme à la pourvoirie ($\rho=0,4710$, $p=0,002$). La température ambiante a aussi une corrélation significative avec les émergences dénombrées à la pourvoirie ($\rho=-0,3002$, $p=0,024$). Il est à noter que cette corrélation est négative, suggérant que l'augmentation de la température ambiante dans cette parcelle entraînerait une diminution du nombre de sporophores de bolets. Afin de bien visualiser ces relations, des graphiques incluant les variations des variables environnementales et le nombre d'émergences ont été réalisés pour chacune des parcelles.

Tableau 1: Corrélations de Spearman réalisées entre les émergences de *Boletus edulis* et les variables environnementales mesurées dans les différentes parcelles d'étude. Entre parenthèses, la valeur de p pour chacune des corrélations

Parcelle / Variable	Température ambiante	Température du sol	Humidité du sol	Pluviométrie	Écart de température
La Pocatière	-0,1401 (p=0,303)	-0,0637 (p=0,640)	0,4836 (p=0,001)	0,1373 (p=0,386)	0,0208 (p=0,879)
St-Bruno 3	-0,1310 (p= 0,336)	0,0298 (p=0,828)	0,0871 (p=0,579)	-0,0169 (p=0,922)	0,1768 (p=0,188)
St-Bruno 2	0,0742 (p=0,587)	0,0279 (p=0,838)	0,1762 (p=0,283)	-0,0274 (p=0,865)	-0,0387 (p=0,775)
St-Bruno 1	-0,0626 (p=0,647)	0,0763 (p=0,576)	-0,0580 (p=0,715)	0,1775 (p=0,261)	0,0053 (p=0,969)
Pourvoirie	-0,3002 (p=0,024)	-0,1324 (p=0,331)	0,4710 (p=0,002)	0,2306 (p=0,147)	-0,0718 (p=0,595)

3.2.2.1 Température

En 2013, la période de fructification s'est étalée sur une plus grande période de temps (du 26 juin au 22 août), reflétant des variations de températures du sol et de l'air plus élevées qu'en 2012. La moyenne de température du sol au sein des différentes parcelles varie entre 12,31 °C et 14,06 °C.

Au cours de la saison, la température la plus froide enregistrée a été de 9 °C (Parcelle la Pourvoirie) alors que la plus élevée a été de 17,16 °C (Parcelle La Pocatière). Tel qu'observé en 2012, il existe une forte corrélation entre la température du sol et de l'air pour l'ensemble des parcelles (La Pocatière $\rho=0,767$ ($p=5,35 \times 10^{-2}$), Saint-Bruno 2 $\rho=0,674$ ($p=1,19 \times 10^{-8}$), Pourvoirie $\rho=0,626$ ($p=2,585 \times 10^{-7}$), Saint-Bruno 1 $\rho=0,651$ ($p=5,596 \times 10^{-8}$), Saint-Bruno 3 $\rho=0,812$ ($p=2,77 \times 10^{-14}$)). Cette corrélation peut être visualisée sur les figures 5 à 9, où nous remarquons que les courbes de température de l'air et de température du sol se suivent de près dans leurs variations. On remarque aussi que la Parcelle La Pocatière présente une température du sol plus élevée que les autres sites, soit de près de 15 °C à 17 °C, s'associant généralement de près avec un écart notable de température entre le jour et la nuit, ce qui pourrait expliquer en partie sa plus forte productivité.

3.2.2.2 Humidité

Pour la majorité des parcelles, nous pouvons observer que la faible pluviométrie enregistrée en début de saison (fin juin à mi-juillet) dans la région a coïncidé avec l'absence d'émergence de bolets. Dans le même ordre d'idée, les précipitations abondantes observées à la fin du mois de juillet et au début du mois d'août semblent avoir stimulé l'apparition des sporophores, qui ont été plus nombreux à cette période. Les émergences les plus hâtives ont été observées à La Pocatière le 26 juin 2013, puis le 10 juillet à Saint-Bruno (Parcelle 2). En observant les graphiques, nous pouvons aussi aisément remarquer que les émergences plus nombreuses de la mi-août correspondent, dans presque tous les cas, à des pics de pluviométrie, aussi associés à une humidité du sol plus élevée. Cependant, la Parcelle Saint-Bruno 3 vient confirmer l'interrelation incontournable de tous les paramètres, car elle se présente comme la plus humide mais la moins productive. La faible présence de mycélium dans le sol pourrait expliquer cela.

3.2.2.3 Choc thermique

L'hypothèse du choc thermique, selon laquelle une diminution rapide et considérable de la température du sol et de l'air provoque l'émergence de sporophores, a été posée. Suite à une observation approfondie des données et des courbes associées, nous avons défini le choc thermique comme étant une chute approximative de 5°C s'étalant sur une période maximale de 3 jours. En observant la courbe d'écart de température ambiante reliée à chacune des parcelles, on observe aussi que les différences de température entre le jour et la nuit oscillent entre 1 °C et 11,8 °C. On remarque par ailleurs que les écarts les plus importants ne sont pas nécessairement

suivis de fortes périodes d'émergences. Par exemple, à la Parcelle Saint-Bruno 2 (Figure 7.a), un écart de température de 11,4 °C a été relevé le 20 juillet et aucune apparition de *Boletus edilus* n'a été notée dans les semaines suivantes. Lorsque nous nous attardons davantage aux données météorologiques, nous pouvons remarquer que cet écart de température est parallèlement associé à une faible humidité du sol ($\leq 60\%$), enregistrée sur le site à la même période. Dans le même ordre d'idée, à la parcelle Pourvoirie (Figure 8.a), on remarque deux écarts de température importants sur un court laps de temps: l'un de 11,2 °C, le 11 juillet, et l'autre de 11,8 °C, le 20 juillet. En observant le nombre d'émergences suivant ces écarts, on constate que des sporophores sont apparus, mais en faible quantité, de 10 à 16 jours plus tard. Ces chocs thermiques étaient eux aussi associés à une humidité du sol inférieure à 60 %, ce qui pourrait expliquer la faible productivité fongique associée.

Si on effectue le raisonnement inverse, soit de déterminer quelle diminution de température a précédé une apparition massive de champignons, on peut observer une tendance générale voulant que de 10 à 16 jours avant les émergences de sporophores, une diminution de température approximative de 4 °C entre le jour et la nuit a été notée dans les parcelles expérimentales.

Ainsi, le concept de choc thermique est certes un facteur induisant la fructification de *Boletus edilus*, mais il demeure cependant étroitement lié à la présence d'autres facteurs favorables à son apparition, tels que l'humidité du sol. De plus, le caractère physique et biologique du site demeure un élément incontournable à considérer; la présence en quantité suffisante de mycélium de *Boletus edulis* dans le sol est essentielle à son apparition. L'importance de la combinaison de tous ces facteurs favorables pour l'émergence du champignon est un phénomène qui a notamment été observé à la parcelle Saint-Bruno 3 (Figure 6.a), où les écarts de température ont été prononcés et fréquents, mais où la productivité de bolets a été extrêmement faible.

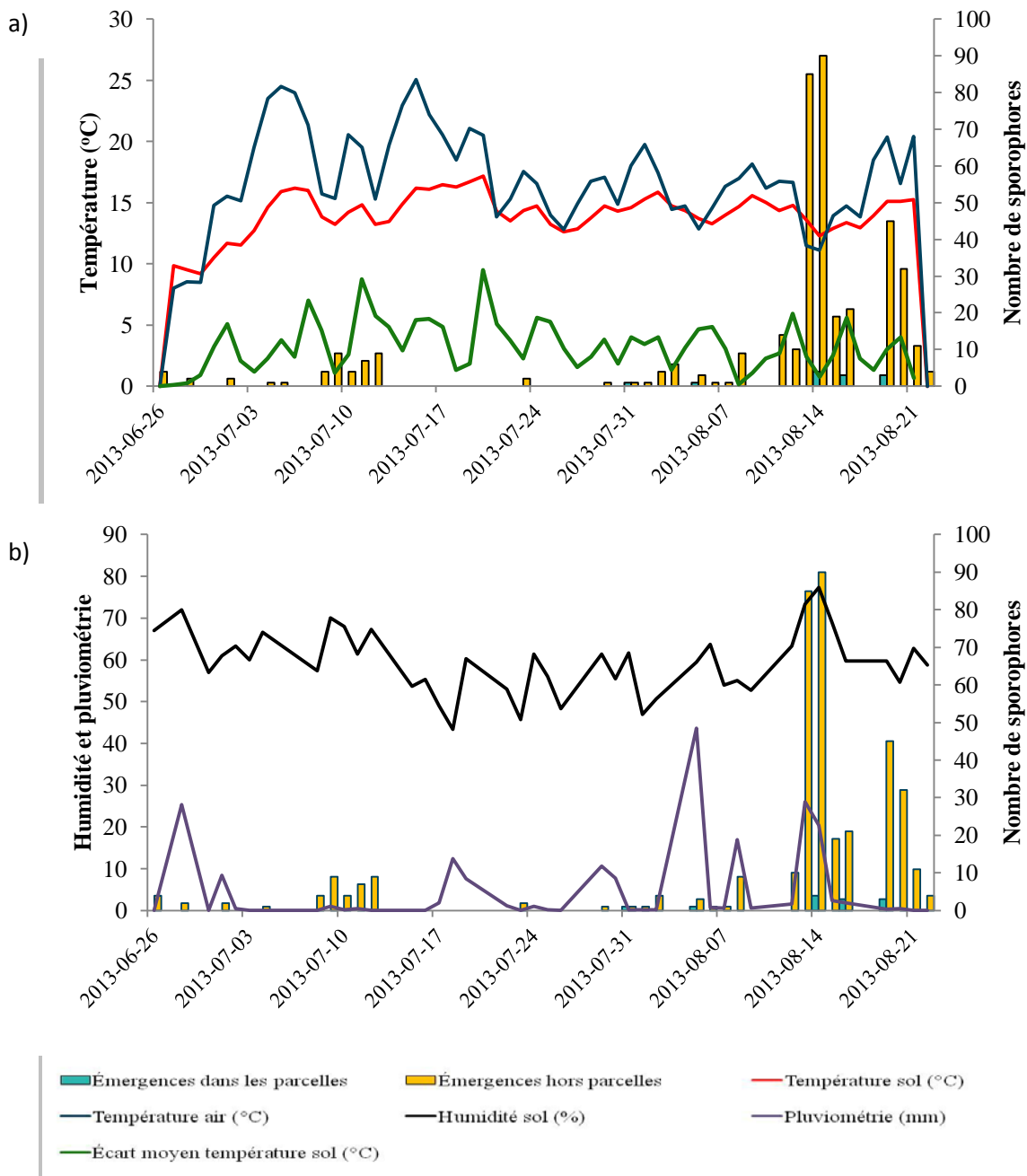


Figure 5: a) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observé à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle La Pocatière et courbes de température du sol, de température ambiante et d'écart journalier de température, en degrés Celsius. b) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle La Pocatière et courbes d'humidité du sol (%) et de pluviométrie (mm)

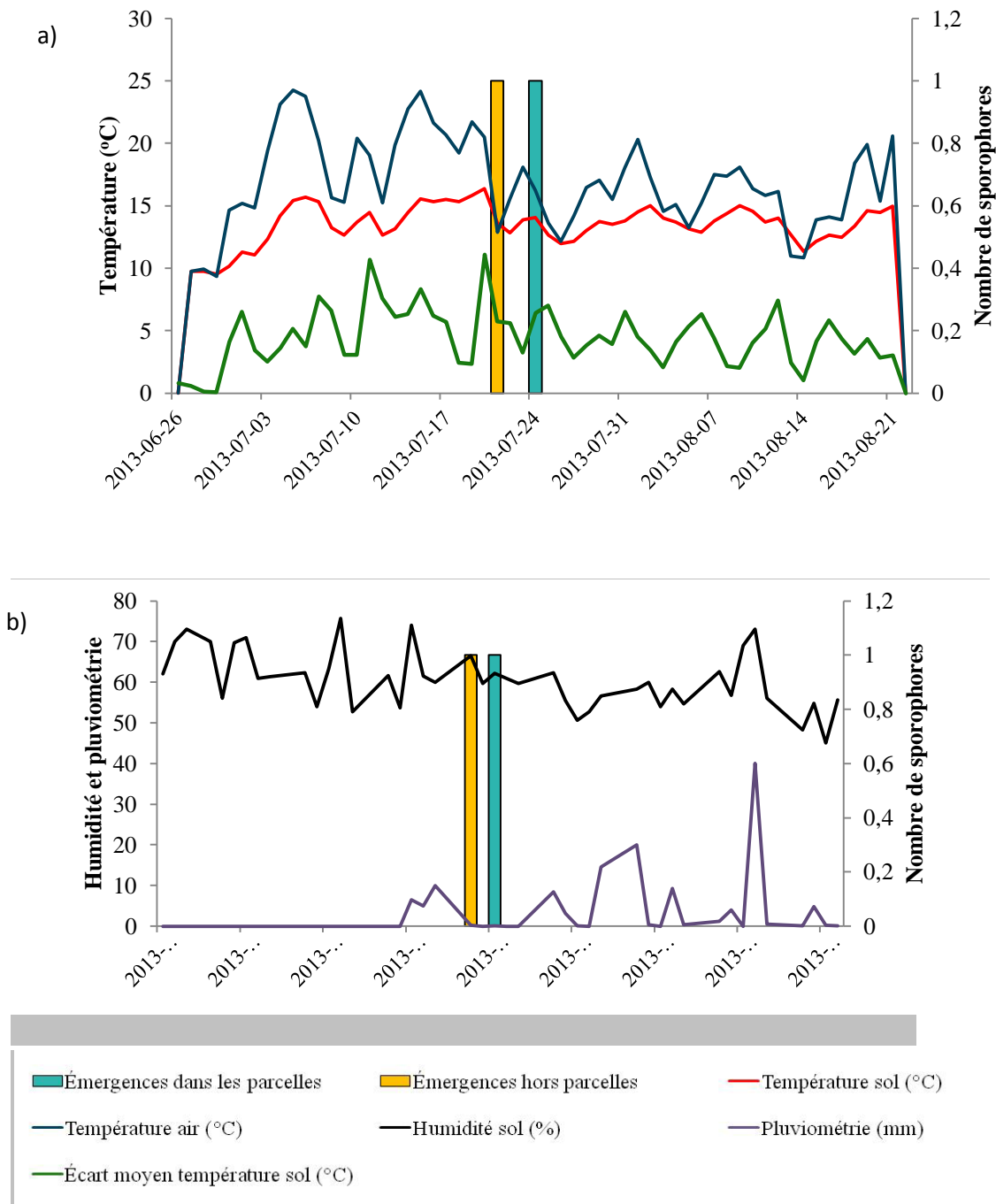


Figure 6: a) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 3 et courbes de température du sol, de température ambiante et d'écart journalier de température, en degrés Celsius. b) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 3 et courbes d'humidité du sol (%) et de pluviométrie (mm)

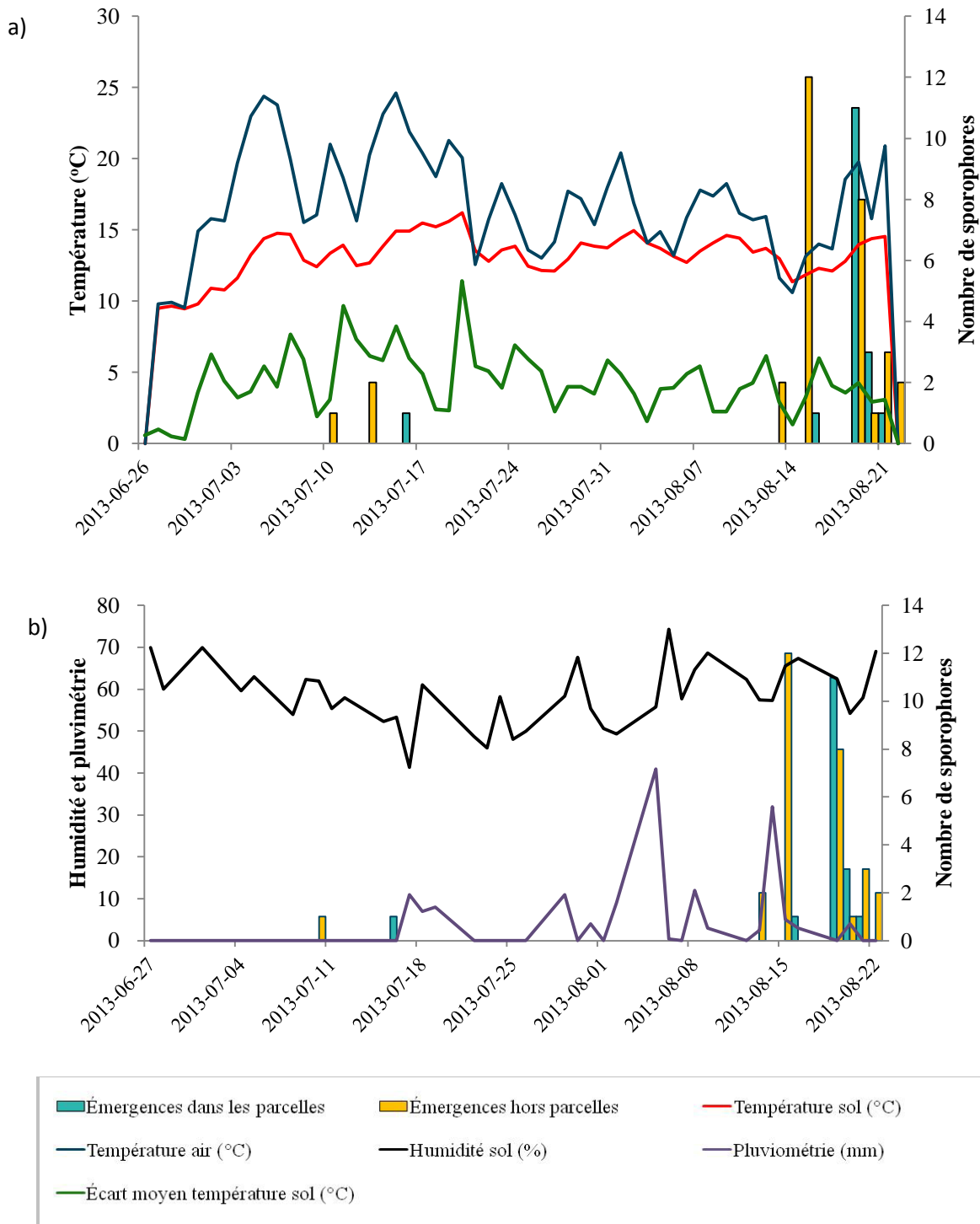


Figure 7: a) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 2 et courbes de température du sol, de température ambiante et d'écart journalier de température, en degrés Celsius. b) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 2 et courbes d'humidité du sol (%) et de pluviométrie (mm)

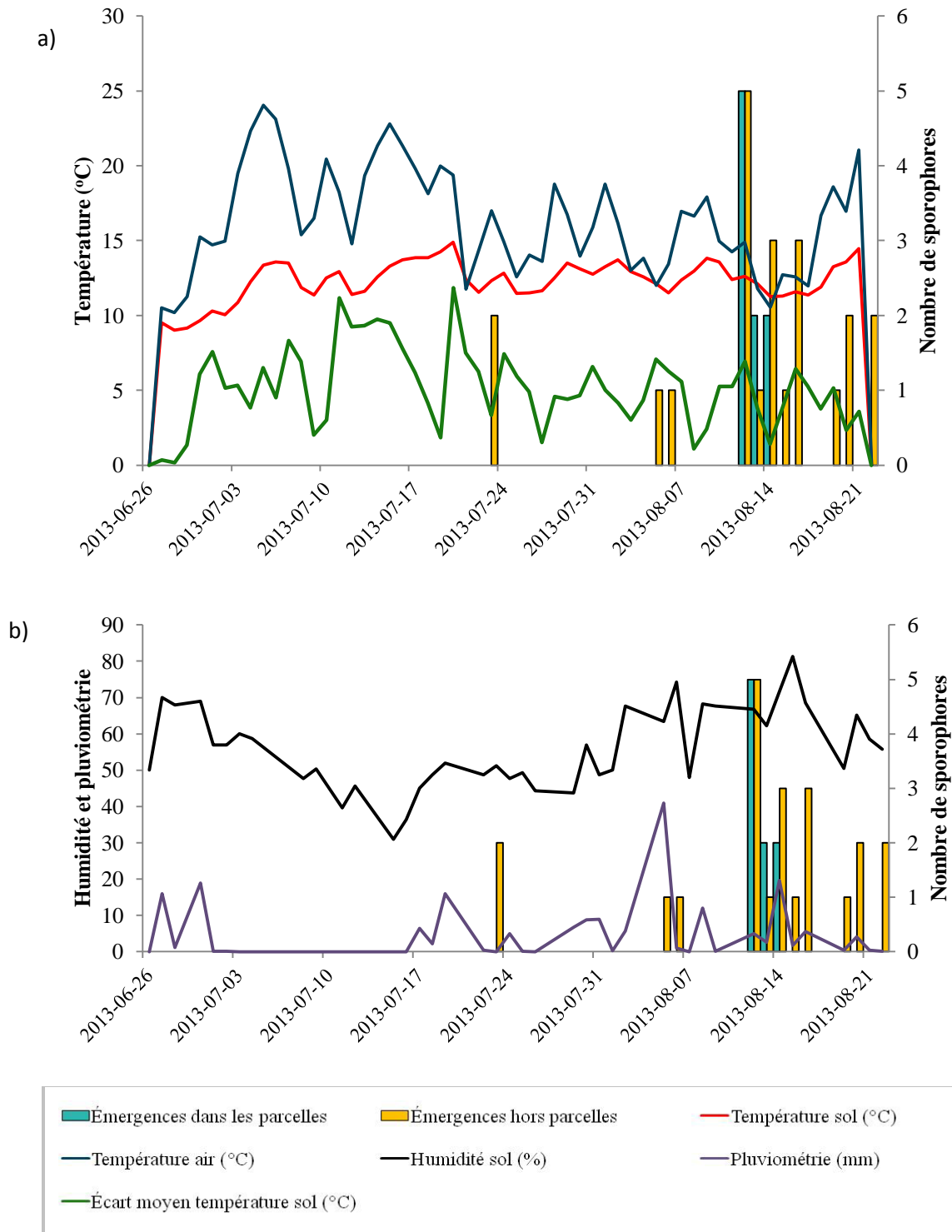


Figure 8: a) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Pourvoirie et courbes de température du sol, de température ambiante et d'écart journalier de température, en degrés Celsius. b) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Pourvoirie et courbes d'humidité du sol (%) et de pluviométrie (mm)

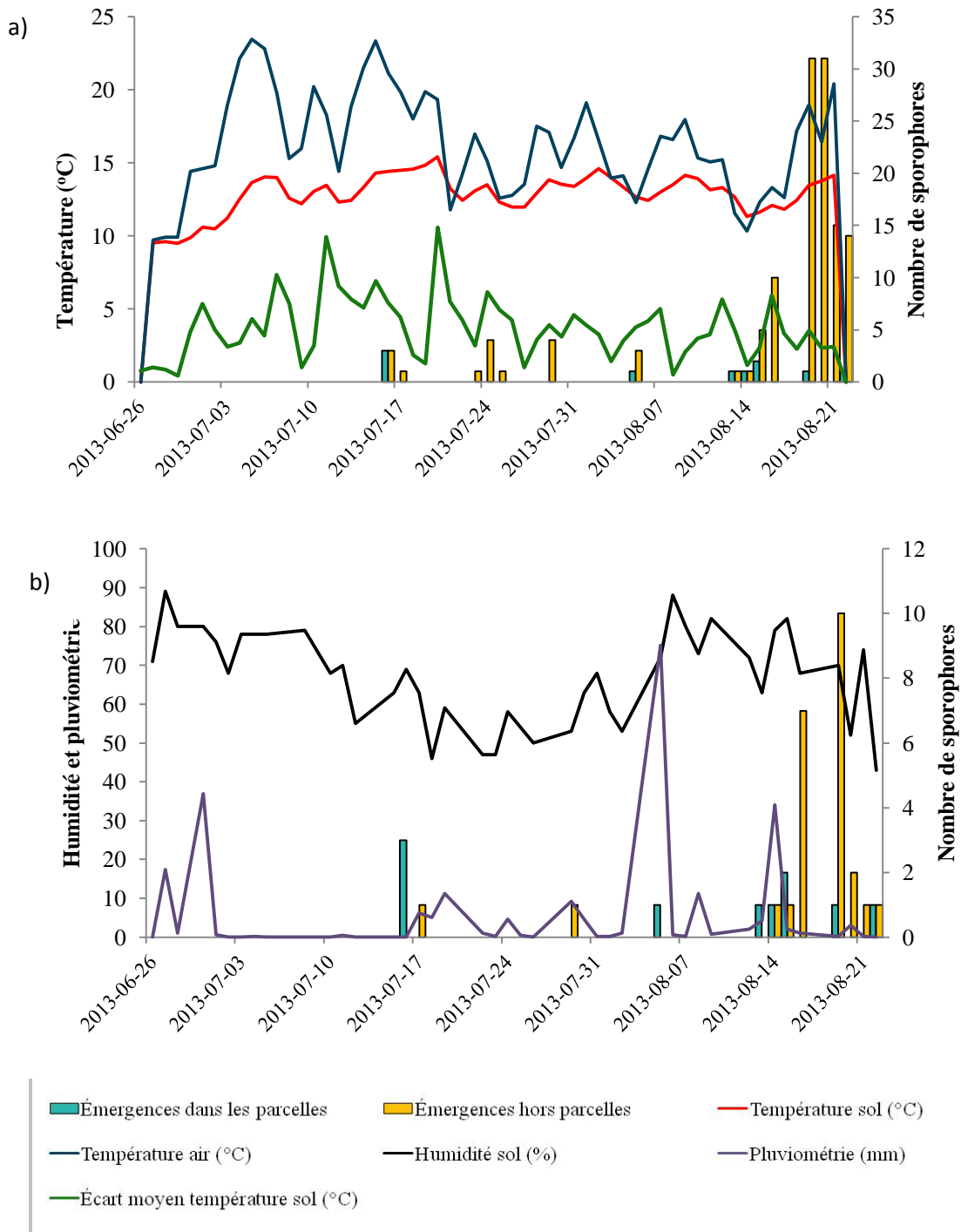


Figure 9: a) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 1 et courbes de température du sol, de température ambiante et d'écart journalier de température, en degrés Celsius. b) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observés à l'intérieur et à l'extérieur de la Parcelle Saint-Bruno 1 et courbes d'humidité du sol (%) et de pluviométrie (mm)

3.2.3 Autres paramètres environnementaux (2011)

Tableau 2: Valeurs des corrélations de Spearman et valeurs de p du modèle linéaire mixte entre les variables environnementales avec pseudoréplication pour chaque section de 10 m et les abondances de *Boletus edulis* en 2011. En gras : données significatives ($p < 0,005$)

Test	Pente	Herbacées	Débris
<i>Corrélation Spearman</i>	0,005	-0,181	-0,170
<i>Modèle linéaire mixte</i>	0,98	$1,35 \times 10^{-7}$	$3,53 \times 10^{-9}$

La corrélation entre la pente et l'abondance de *Boletus edulis* est très faible, et non significative. Les résultats du modèle linéaire mixte sont eux aussi non significatifs, suggérant que cette variable n'a pas d'impact sur l'espèce étudiée.

Une corrélation négative entre le recouvrement par les plantes herbacées et les abondances de *Boletus edulis* a été observée. L'effet des herbacées sur la productivité des champignons est par ailleurs hautement significatif pour cette espèce (Tableau 5). La présence de plantes herbacées sur le parterre forestier est susceptible de modifier les conditions environnementales du peuplement (pH, humidité, température du sol) auxquelles les champignons sont sensibles. La présence de plantes herbacées dans le peuplement forestier, accompagnées d'un cortège fongique de type arbusculaire plutôt qu'ectomycorhizien (Fortin *et al.* 2008), est aussi susceptible d'éliminer les communautés d'ECM (Jones *et al.* 2003), dont fait partie *Boletus edulis*.

La corrélation de Spearman entre les débris ligneux et l'abondance de cèpes est aussi négative, mettant en évidence l'impact négatif de la matière ligneuse accumulée au sol sur la productivité des champignons (Tableau 5). Le modèle linéaire mixte établit une influence significative de cette variable sur *Boletus edulis*. L'impact négatif de cette variable sur l'abondance des champignons peut être partiellement expliqué par certaines modifications du microclimat entraînées par les débris, notamment au niveau de l'humidité et de la température du sol (Stevens 1997), deux variables auxquelles les champignons sont particulièrement sensibles (Pinna *et al.* 2010).

Tableau 3: Valeur des corrélations de Spearman et valeurs de p des facteurs fixes inclus dans le modèle linéaire simple mettant en relation les abondances de *Boletus edulis* et les variables environnementales sans pseudoréplication

Test	pH	Luminosité	Surface terrière	Argile	Limon	T°sol
<i>Corrélation Spearman</i>	0,12	-0,563	0,131	-0,218	-0,002	-0,244
<i>Modèle linéaire simple</i>	0,706	0,092	0,268	0,128	0,42	0,241

La luminosité au sol est négativement corrélée avec les abondances de *Boletus edulis*; toutefois, bien que cette corrélation soit significative, les résultats du modèle suggèrent que, globalement, cette variable a peu d'impact sur l'espèce étudiée.

La surface terrière, l'acidité, la température du sol et la texture du sol ont peu d'influence sur la productivité de *Boletus edulis*; les résultats des corrélations de Spearman et du modèle linéaire simple pour ces variables sont tous non significatifs.

L'ensemble de ces résultats suggère que la productivité de *Boletus edulis* est principalement affectée par la présence de plantes herbacées et de débris ligneux au sol, deux variables qui ont un impact négatif significatif sur le nombre de sporophores observés chez cette espèce.

3.3 Développement d'un outil bioclimatique

Le développement d'un outil visant à prévoir l'émergence des sporophores de bolets cèpes prend toute son importance lorsque nous constatons que la durée de vie du sporophore est très courte, et que celui-ci devient rapidement parasité par les larves d'insectes. En nous indiquant les périodes exactes où le champignon émerge, l'outil pourrait nous permettre de récolter les cèpes au stade « bouchon de champagne », auquel leur valeur commerciale est la plus élevée. Le modèle conçu dans le présent projet s'est principalement appuyé sur des valeurs optimales de températures ambiantes et d'humidité du sol. Ainsi, en s'appuyant sur la littérature scientifique et nos observations au cours de la saison, nous avons considéré la plage de température de l'air de 10 à 20 °C comme étant idéale pour la fructification, avec une température optimale de 16 °C. L'humidité du sol que nous avons considérée comme la plus favorable est de 70 % (Figures 5 à 9).

Les simulations actuellement réalisées avec l’outil nous permettent de constater qu’il permet de prévoir des abondances qui se rapprochent de celles observées au cours de la saison 2013. Dans l’exemple présenté ci-bas, pour les émergences observées dans la Parcelle La Pocatière (Figure 10 b), nous pouvons observer que la probabilité de trouver des sporophores (présentée en y) est très élevée à partir du 26 juillet jusqu’à la fin août, période à laquelle les plus abondantes poussées ont réellement été observées. L’augmentation de la probabilité de récolte les 10, 11 et 12 juillet coïncide également avec une émergence réelle relevée à ces dates.

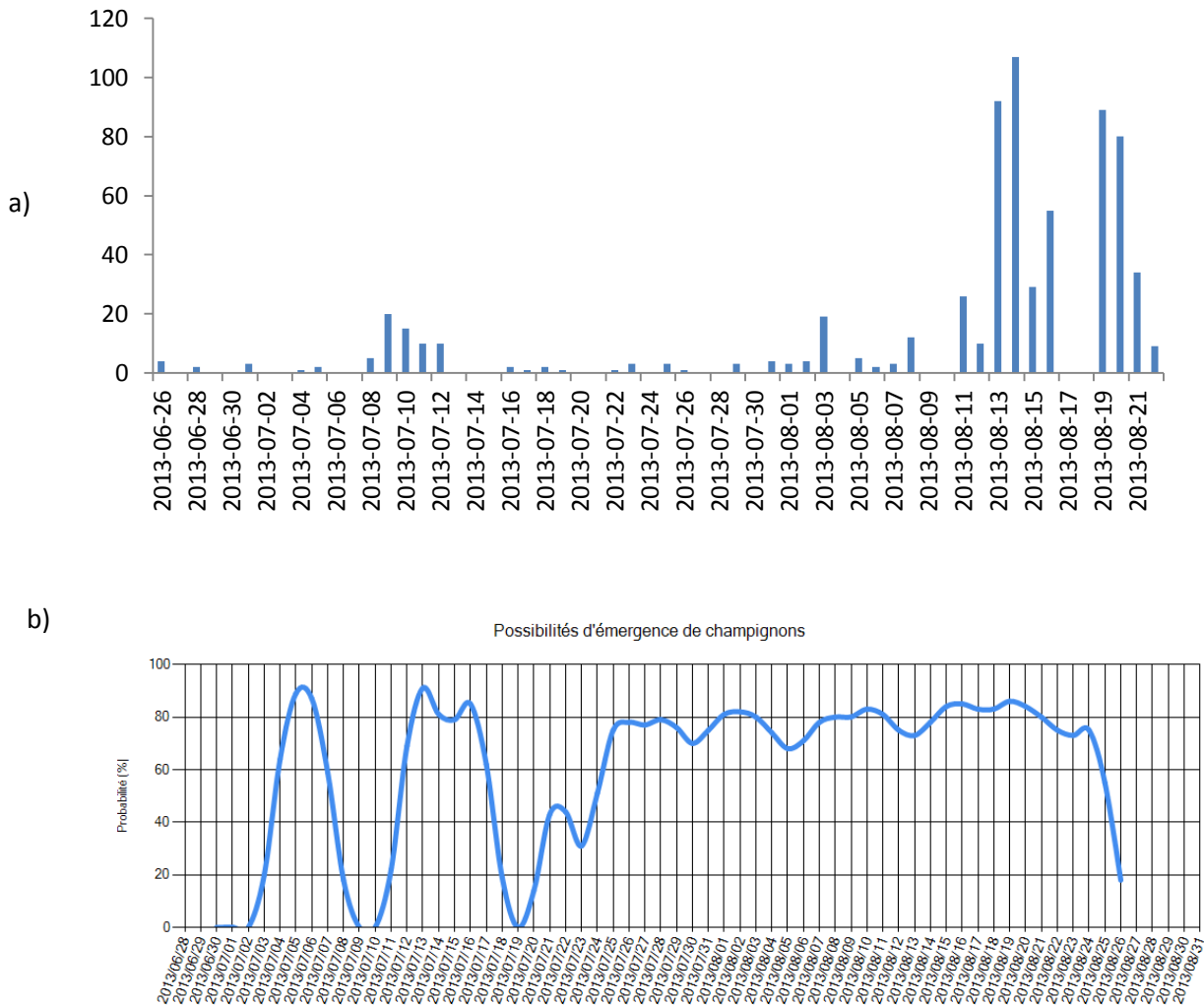


Figure 10: Probabilité d'émergence des sporophores de *Boletus edulis*, selon l'outil développé (modèle 1). a) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observés à la Parcelle La Pocatière au cours de la saison d'échantillonnage de 2013. b) Probabilité d'émergence des bolets selon l'outil bioclimatique, selon le modèle basé sur les températures et humidité du sol optimales

En se basant sur les mêmes principes, selon lesquels la température et l'humidité jouent un rôle crucial dans la fructification de *Boletus edulis*, un second modèle de prévision a été conçu. En s'attardant davantage sur les données récoltées en 2013, nous avons, dans un premier temps, constaté que les baisses importantes de températures de l'air (choc thermique), accompagnées de périodes où la température de l'air et la température du sol étaient égales (c'est-à-dire au moment où ces courbes se croisent sur les Figures 5 à 9), étaient généralement suivies d'une émergence importante, 8 jours plus tard. Lorsque les courbes de température de l'air et du sol se croisent, le sol se situe à une température variant entre 11,29 °C et 14,75 °C selon le site et la période de la saison, avec une moyenne de 12,97 °C.

Concernant l'humidité, les données enregistrées nous ont permis d'observer que l'humidité du sol à laquelle poussent les champignons est minimalement de 46 %, et de 77 % au maximum. Les émergences sont par ailleurs plus nombreuses lorsque l'humidité du sol est au-dessus de 52 %, avec une moyenne de 55 %. L'humidité étant étroitement liée à la pluviométrie enregistrée sur un site, nous nous sommes aussi attardés à cette variable, pour constater que les émergences étaient souvent précédées de quantités importantes de pluie. Pour intégrer ce paramètre dans le modèle, les précipitations ont été cumulées sur une période de 8 jours entre le choc (associé au croisement des courbes de la température de l'air et de la température du sol) et l'émergence. La pluviométrie a été intégrée au modèle sous forme de catégorie (> 50 mm = probabilité d'émergence de 90 % et plus; entre 15 et 50 mm = entre 50 et 90 % de probabilité d'émergence; < 15 mm = moins de 50 % de probabilité d'émergence).

Finalement, le modèle a dû considérer le fait que les périodes d'émergence perdurent généralement plusieurs jours (en moyenne 4).

L'intégration de l'ensemble de ces paramètres dans le modèle nous a permis de créer un outil bioclimatique dont les probabilités d'émergence se situent très près des émergences réelles qui ont été observées au cours de la saison 2013. L'exemple ci-dessous, qui a été réalisé avec les données de la Parcelle La Pocatière, est éloquent : les périodes auxquelles de grandes quantités

de cèpes ont été récoltées se traduisent, sur le modèle, par des probabilités beaucoup plus élevées d'émergence.

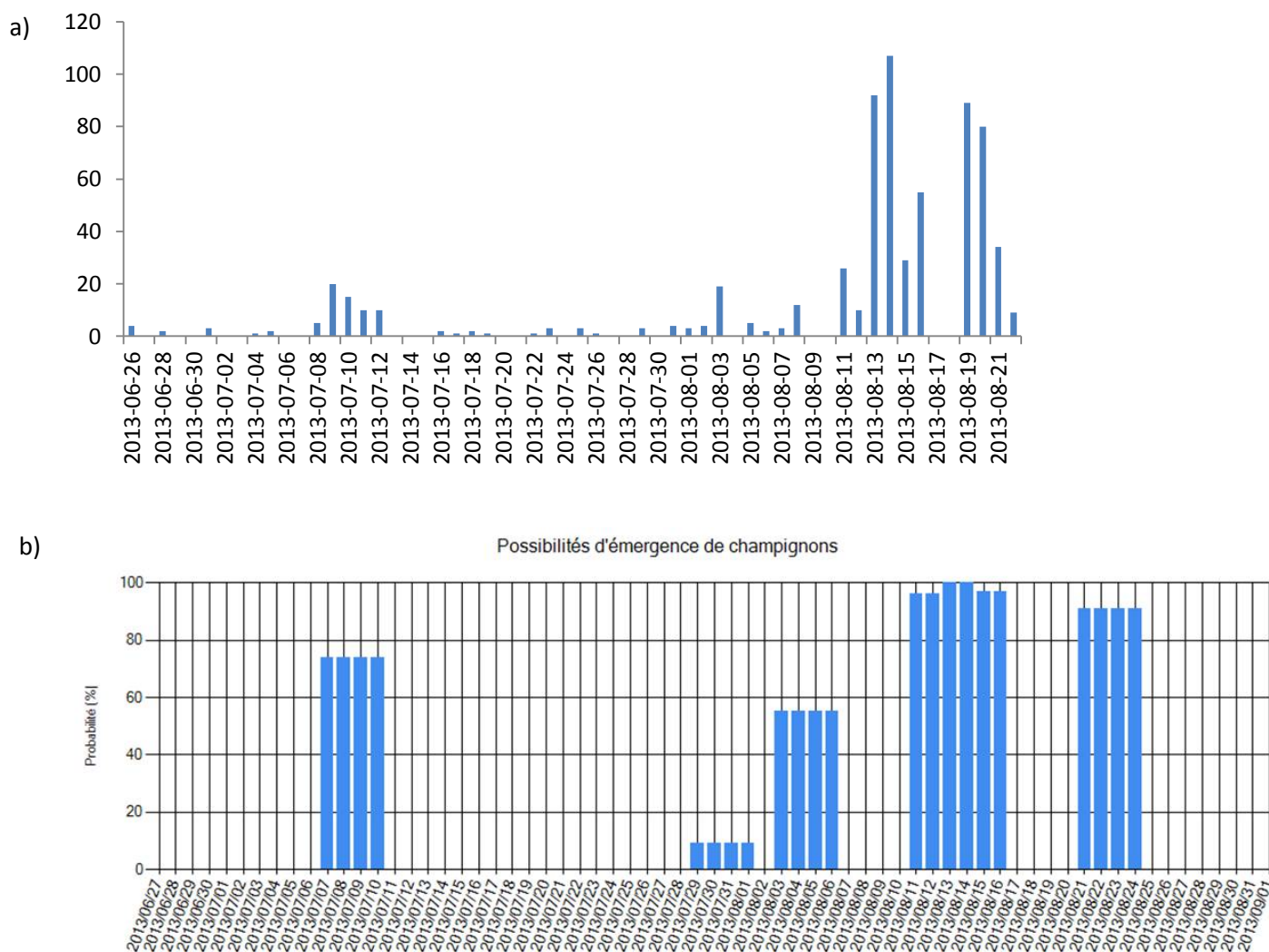


Figure 11: Probabilité d'émergence des sporophores de *Boletus edulis*, selon l'outil développé (modèle 2). a) Nombre de sporophores de *Boletus edulis* observés à la Parcelle La Pocatière au cours de la saison d'échantillonnage de 2013. b) Probabilité d'émergence des bolets selon l'outil bioclimatique, selon le modèle basé sur le choc thermique

Bien que les prévisions obtenues par les deux modèles s'approchent grandement des émergences qui ont eu lieu en 2013, la performance de l'outil devra être précisée. En considérant la très courte durée de vie de *Boletus edulis*, il demeure effectivement primordial de raffiner l'outil afin que les probabilités d'émergences s'approchent davantage de la réalité. L'intégration d'un plus grand nombre de données, réparties sur une échelle temporelle plus importante, agirait en ce sens, et nous permettrait par ailleurs de considérer la variabilité interannuelle associée à la productivité du cèpe. Il serait par ailleurs intéressant de considérer de nombre de degrés-jours auquel les sporophores commencent à apparaître; des observations préliminaires nous laissent

croire que 90 degrés-jours de croissance sont nécessaires à l'apparition des cèpes. L'inclusion de ce paramètre dans le modèle, qui nous permettrait d'évaluer le délai entre le choc et la date de l'émergence, demeure toutefois à préciser.

4. Conclusion

Le projet « Développement d'un outil bioclimatique de prévision des émergences des champignons à potentiel commercial » visant à développer une connaissance et une compréhension accrue de la biologie du bolet cèpe, aura permis de répondre aux différents objectifs spécifiques prévus. Le projet, d'abord prévu pour 2012, a dû être prolongé jusqu'en 2013 étant donné la période de sécheresse qui a été observée en 2012, associée à une très faible productivité de bolets.

Préciser les caractéristiques biologiques et physicochimiques des sites où abondent les bolets cèpes

Chacune des parcelles étudiées a été dûment caractérisée en termes de paramètres physiques et environnementaux (texture, densité du sol, éléments nutritifs, pH, pente et luminosité, âge, superficie, surface terrière). Différentes variables biotiques, telles que la présence de plantes herbacées et les essences arborescentes présentes sur le site ont aussi été définies. Cette description détaillée des sites étudiés (Annexe 1) nous a permis de vérifier les caractéristiques communes que partagent ces peuplements productifs en bolets cèpes; il s'agit de plantations d'épinettes blanches et/ou de Norvège dont la surface terrière est élevée et dont le sol est un loam sablonneux au pH faible.

Préciser les paramètres bioclimatiques qui influencent le développement phénologique du bolet cèpe

Les principaux résultats nous laissent croire que l'humidité du sol et les écarts journaliers de températures ambiantes (chocs thermiques) sont des variables qui influencent la fructification du bolet cèpe. Effectivement, les grandes augmentations de température, suivies d'une période plus froide, sont généralement associées à l'apparition de champignons, dans la mesure où l'humidité du sol demeure supérieure ou égale à 55 % en moyenne. Par ailleurs, la majorité des champignons ont été récoltés, en 2013, à partir de la mi-août, alors que les précipitations ont été plus abondantes. Effectivement, une accumulation de plus de 50 mm dans les 8 jours suivant un choc thermique augmenterait grandement les probabilités d'émergence.

Établir une corrélation précise entre les stades de développement des sporophores de bolet cèpe et les paramètres bioclimatiques influents

En 2012, au cours de la période d'échantillonnage, 9 bolets ont été récoltés. En 2013, c'étaient 49 bolets qu'on retrouvait dans nos parcelles (919 hors parcelle). Le suivi rapproché des sporophores observés en 2013 nous a permis de déterminer que le champignon avait une durée de vie moyenne de 2,3 jours, après quoi sa commercialisation devenait impossible vu la présence abondante de parasite et la décomposition entamée. Ces informations sont d'une importance capitale dans le développement de l'outil bioclimatique et de son application par les cueilleurs et industries œuvrant dans le domaine des champignons forestiers comestibles. Ainsi, l'intégration des paramètres bioclimatiques dans l'outil permettra de prévoir avec précision le moment où le bolet émergera du sol; le cueilleur saura par la suite qu'il doit aller récolter les sporophores dans les deux jours suivant cette émergence, sans quoi le champignon aura perdu sa valeur commerciale.

Éventuellement, l'analyse d'un plus grand nombre de données, réparties sur une échelle temporaire plus importante, permettrait de considérer la variabilité interannuelle associée à la productivité du cèpe.

Développer une base de données dans laquelle seront intégrées les informations qui permettront de prévoir l'émergence des champignons en temps et en lieu

L'outil de prévision de l'émergence, basé sur les variables bioclimatiques, a été conçu à partir d'un système de pointage. Deux modèles ont été conçus; dans le premier cas, le modèle s'est concentré uniquement sur la température ambiante et l'humidité du sol. Ce modèle de prévision présente des abondances similaires aux volumes qui ont été récoltés en 2013, soulignant que les paramètres qui y ont été intégrés jouent un rôle primordial dans la fructification du champignon.

Le second modèle a considéré la présence d'un choc thermique. Ainsi, le choc thermique, c'est-à-dire une chute de température de l'air de plusieurs degrés, accompagné d'une période où la température moyenne du sol est de 12,97 °C et est égale à la température de l'air (moment où ces courbes se croisent), ont contribué à augmenter les probabilités d'émergence du champignon dans l'outil. Pour qu'il y ait émergence, ces conditions doivent être accompagnées d'une

humidité du sol au-dessus de 52 %, avec une moyenne de 55 %. Les résultats obtenus, très près des émergences qui ont réellement été observées, confirment le fort potentiel de l'outil bioclimatique à prévoir les émergences de bolets en fonction des paramètres climatiques. Il serait par ailleurs intéressant de considérer la variable « degrés-jours de croissance », qui pourrait nous permettre de raffiner l'outil en précisant le délai entre le choc thermique et l'émergence des champignons.

Ultimement, des cartes écoforestières localisant les peuplements possédant les caractéristiques favorables pour la production de bolets (voir section 3.1) pourraient bonifier l'outil. Nos analyses statistiques ayant démontré la forte corrélation entre la température de l'air et la température du sol, il serait par ailleurs envisageable d'adapter l'outil aux données météorologiques relevées par Environnement Canada; l'application de l'outil pourrait alors être élargie à l'ensemble des régions couvertes par Environnement Canada, et l'utilisation de iButton, plus coûteuse et nécessitant une certaine logistique, ne serait alors plus nécessaire. Cette éventualité demeure une piste intéressante dans le développement et la valorisation des ressources des régions plus éloignées. Il est par ailleurs intéressant de considérer que l'outil bioclimatique pourra par la suite être applicable à toutes les espèces de champignons forestiers à potentiel commercial, dans la mesure où les conditions climatiques et environnementales favorables à chacune des espèces sont déterminées.

Références

- AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. 2004. CIPRA : Centre informatique de prévisions des ravageurs en agriculture, version 10, *Guide d'utilisation*, 23 p.
- BIOPTERRE. 2009. *Analyse de commercialisation des champignons forestiers sauvages à potentiel commercial du Québec*, Projet AF-08-021, La Pocatière, Québec, 78 p. +annexes.
- CENTRE RÉGIONAL DE LA PROPRIÉTÉ FRANÇAISE (CRPF). 2012. *Sols acides, sols calcaires, conséquences pour la forêt?* Forêt privée française, Fiche n° 273402, 2 p.
- CONFÉRENCE RÉGIONALE DES ÉLUES DU BAS-ST-LAURENT (CREBSL). 2010. *Plan régional de développement intégré des ressources et du territoire (PRDIRT)*, Bas-Saint-Laurent. 242 p.
- DUCHESNE, L. 2004. *Présentation au colloque sur les produits forestiers non ligneux, ITA, campus de La Pocatière*, février 2004.
- ENVIRONNEMENT CANADA. 2012. *Climat*, En ligne : URL : <http://climat.meteo.gc.ca/>
- EVELING, D.W., R.N. WILSON, E.S. GILLESPIE et A. BATAILLÉ. 1990. *Environmental effects on sporocarps counts over fourteen years in a forest area*, Mycological Research 94: 998-1002.
- FORTIN, J.A., C. PLENCHETTE et Y. PICHÉ. 2008. *Les mycorhizes, la nouvelle révolution verte*, Éditions Multimondes et Éditions Quae, Québec, 131 p.
- GÉVRY, M.-F. 2010. *Évaluation du potentiel en champignons forestiers comestibles au Lac Saint-Jean*, Mashteuiatsh, Québec, 54 p.
- GÉVRY, M.-F. 2008. *Projet d'intégration de la récolte des champignons forestiers comestibles dans la communauté — Secteur de Mont-Louis : description du projet, résultats des inventaires et perspectives d'avenir locales*, Comité de bassin de la rivière Mont-Louis, Mont-Louis, Québec, 65 p. + annexes.
- HALL, I. 2003. *Boletus edulis - eating mushroom*, Invermay Agricultural Centre, New-Zealand.
- Hall, I., A.J.E LYON, Y. WANG et L. SINCLAIR. 1998. *Ectomycorrhizal Fungi with Edible Fruiting Bodies 2, Boletus Edulis* Economic Botany 52 (1) : p. 44-56.
- JONES, M.D., D.M. DURALL et W.G. CAIRNEY. 2003. *Ectomycorrhizal fungal communities in young forest stands regenerating after clearcut logging*, Tansley review, New Phytologist 157: 399-422.
- LAMBANY, M. 2012. *Effets de l'éclaircie commerciale dans les plantations d'épinettes sur la productivité des champignons forestiers comestibles*, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 64 p.

- LAMÉRANT, G., F. LEBEL, G. LANGLAIS et A. VÉZINA. 2008. *Mise en valeur des produits forestiers non ligneux*, CEPAF, La Pocatière, 181 p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (MRNF). 2009. *Projet de loi n° 57. Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier*, Québec, 112 p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (MRNF). 2008. *La forêt, pour construire le Québec de demain*, Québec, 73 p.
- MÜSSENBERGER, F. 2007. *Les plantations résineuses du Bas-Saint-Laurent; comment les convertir en futaies irrégulières*, La forêt modèle du Bas-Saint-Laurent inc., 67 p.
- O'DELL, T.E., J.F. AMMIRATI et E.G. SCHREINER. 1999. *Species richness and abundance of ectomycorrhizal basidiomycete sporocarps on a moisture gradient in the Tsuga heterophylla zone*, Canadian Journal of Botany 77: 1699–1711.
- PINNA, S., M.-F. GÉVRY, M. CÔTÉ et L. SIROIS. 2010. *Factors influencing fructification phenology of edible mushrooms in a boreal mixed forest of Eastern Canada*, Forest Ecology and management 260: 294-301.
- POMINVILLE, P., S. DÉRY et L. BÉLANGER. 1999. *Dynamique de la sapinière à bouleau jaune de l'est après une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette*, Forestry Chronicle 75(3): 515-534.
- STEVENS, V. 1997. *The ecological role of coarse woody debris: an overview of the ecological importance of CWD in B.C. forests*, Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C. Work. Pap. 30 p.

Annexe 1 : Caractérisation des sites d'étude

1. Parcelle Saint-Bruno 1

	Saint-Bruno 1	Parcelle 1	Parcelle 2
	Essence	Épinettes de Norvège (<i>Picea abies</i>)	
	Âge	35 ans	
	Superficie (ha)	7,46	
	Surface terrière (m ² /ha)	42	
	Luminosité du peuplement (PAR)	351,05	
	Recouvrement débris ligneux (%)	20	
	Recouvrement herbacée (%)	< 5	
	Pente (%)	12	
	Caractéristiques du sol		
	Ph	4,1	4,7
	% matière organique	4,9	5,3
kg/Ha	P	47	41
	K	52	90
	Ca	544	2077
	Mg	58	47
ppm	Al	1021	992
	Mn	20,2	15,3
	Cu	0,21	0,2
	Zn	1,39	0,77
	B	0,18	0,21
	Fe	448	392
	Densité (g/cm ³)	1,08	1
	Porosité (%)	58	61
	Texture		
	Sable (%)	62,2	64,7
	Limon (%)	28,4	24
	Argile (%)	9,4	11,3

2. Parcelle Saint-Bruno 2

	Saint-Bruno 2	
	Essences	Épinettes de Norvège (<i>Picea abies</i>) Épinette blanche (<i>Picea glauca</i>)
	Âge	26 ans
	Superficie (ha)	6,5
	Surface terrière (m ² /ha)	29
	Luminosité du peuplement (PAR)	102,5
	Recouvrement débris ligneux (%)	15
	Recouvrement herbacé (%)	5
	Pente (%)	12
	Caractéristiques du sol	
	Ph	4,6
	% matière organique	8,6
kg/Ha	P	33
	K	188
	Ca	692
	Mg	120
ppm	Al	1596
	Mn	0,49
	Cu	58,6
	Zn	2,26
	B	0,36
	Fe	396
	Densité (g/cm ³)	0,81
	Porosité (%)	67,8
	Texture	
	Sable (%)	58,1
	Limon (%)	37,20
	Argile (%)	4,7

3. Parcelle Saint-Bruno 3

Parcelle Saint-Bruno 3	
Essence	Épinettes de Norvège (<i>Picea abies</i>)
Âge	31
Superficie (ha)	3
Surface terrière (m ² /ha)	40
Luminosité du peuplement (PAR)	109,85
Recouvrement débris ligneux (%)	40
Recouvrement herbacée (%)	5
Pente (%)	6
Caractéristiques du sol	
Ph	4,6
Texture	
Sable (%)	55
Limon (%)	29,4
Argile (%)	15,6

4. Parcelle Pourvoirie

Parcelle Pourvoirie	
Essence	Épinettes de Norvège (<i>Picea abies</i>)
Âge	30
Superficie (ha)	14,5
Surface terrière (m ² /ha)	32
Luminosité du peuplement (PAR)	773,95
Recouvrement débris ligneux (%)	15
Recouvrement herbacée (%)	5
Pente (%)	8
Caractéristiques du sol	
Ph	4,1
Texture	
Sable (%)	69,8
Limon (%)	18,9
Argile (%)	11,3

5. Parcelle Saint-Adalbert

	Saint-Adalbert	Parcelle 1	Parcelle 2
	Essence	Épinettes de Norvège (<i>Picea abies</i>)	
	Âge	32 ans	
	Superficie (ha)	2,8	
	Surface terrière (m ² /ha)	54	
	Luminosité du peuplement (PAR)	162,35	
	Caractéristiques du sol		
	Ph	4,9	4,3
	% matière organique	10,5	9,6
kg/Ha	P	28	37
	K	61	82
	Ca	2886	568
	Mg	86	27
ppm	Al	1267	1369
	Mn	20,7	7,9
	Cu	0,31	< 0,2
	Zn	1,71	1,32
	B	0,25	0,21
	Fe	369	441
	Densité (g/cm ³)	0,81	0,74
	Porosité (%)	67,5	70,5
	Texture		
	Sable (%)	52,3	52,4
	Limon (%)	36,3	36,3
	Argile (%)	11,4	11,3

6. Parcelle La Pocatière

	La Pocatière	Parcelle 1	Parcelle 2
	Essence	Épinettes de Norvège (<i>Picea abies</i>)	
	Âge	35 ans	
	Superficie (ha)	1,12	
	Surface terrière (m ² /ha)	NA	
	Luminosité du peuplement (PAR)	163,55	
	Recouvrement débris ligneux (%)	10	
	Recouvrement herbacée (%)	5	
	Pente (%)	10	
	Caractéristiques du sol		
	Ph	4,3	6,1
	% matière organique	7	9,1
kg/Ha	P	32	38
	K	135	157
	Ca	923	5901
	Mg	130	502
ppm	Al	1372	823
	Mn	51,8	160,8
	Cu	0,25	1,98
	Zn	2,2	1,63
	B	0,24	0,95
	Fe	473	165
	Densité (g/cm ³)	0,94	0,83
	Porosité (%)	62,7	66,9
	Texture		
	Sable (%)	58,3	56,4
	Limon (%)	24,4	26,3
	Argile (%)	17,3	17,3

Annexe 2 : Fiche de visite d'un site d'étude de *B. edulis* – Projet AF-12-203

Nom de l'observateur: _____ **Date:** ____ / ____ / (j/m/an)

Site: La Pocatière () Saint-Bruno () Saint-Adalbert () **Heure:** _____ h

PROTOCOLE

1. Marcher sur la ligne centrale du transect et compter le nombre de fructifications à chaque segment de 10 m (soit entre 2 arbres munis d'un ruban forestier rose).
2. Décapiter le chapeau des fructifications HORS PARCELLE pour ne pas les recompter ultérieurement.
3. Écrire entre parenthèses le nombre de fructifications visibles mais hors transect.
4. Lorsqu'arrivé à une **parcelle (ruban bleu)** :
 - Identifier chaque nouvelle fructification avec un piquet gradué et numéroté. Pour ce faire, enfoncer le piquet à la première graduation et considérer le sol comme la hauteur « 0 ».
 - Noter la hauteur de chaque fructification dans le tableau approprié.
 - Prendre une photo de chaque fructification en prenant soin de voir les graduations du piquet sur la photo.

Données à récolter dans les parcelles de prise de données à chaque visite

Paramètres	Parcelle 1 (_____ m)	Parcelle 2 (_____ m)
Humidité du sol (sonde)	_____ cb	_____ cb
Pluviométrie		

Données à récolter sur le reste du peuplement

AA	A	B	C

