

VALORISER LA DRÊCHE DE MICROBRASSERIE GRÂCE À LA CULTURE DE CHAMPIGNONS

Isabelle Geoffrion (260491299)

Marie-Christine Marmette (260578834)

Engineering Design 3 - BREE 495

Professeur Grant Clark

Génie des Bioressources



McGill

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ EXPLICATIF.....	2
COMPÉTITION	2
INTRODUCTION.....	2
<i>Information sur le client</i>	2
<i>Mentorat</i>	2
<i>Répondre aux besoins du microbrasseur</i>	2
<i>Détails et limites</i>	3
ÉTUDE DE MARCHÉ.....	3
EXPÉRIENCE DE CULTURE SUR DRÊCHE DE BRASSERIE	5
DÉBIT MASSIQUE DE DRÊCHE ET TEMPS DE RÉTENTION À L'INTÉRIEUR DU SYSTÈME.....	7
<i>Préparation du substrat</i>	8
<i>Évaluation du rendement</i>	10
COMPOSANTES DU SYSTÈME	11
<i>Système de pasteurisation et remplissage de sacs</i>	11
<i>Système de sacs sur rails pour la période de croissance complète jusqu'à fructification</i>	13
Nombre de sacs selon le débit massique de DDB.....	13
Choix des matériaux pour les rails.....	14
<i>Chambre de croissance à atmosphère contrôlée pour la propagation du mycélium</i>	15
Dimensions de la chambre	15
Contrôle de l'environnement	16
<i>Chambre de croissance à atmosphère contrôlée pour la formation des primordia et le développement des fructifications</i>	18
Dimensions de la chambre	18
Contrôle de l'environnement	19
<i>Espace d'entreposage</i>	21
SUBSTRAT USÉ	21
ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE.....	21
<i>Approche ascendante</i>	21
<i>Approche descendante</i>	22
TESTS À EFFECTUER.....	23
ANALYSE ÉCONOMIQUE	23
<i>Dépenses</i>	23

<i>Revenus</i>	27
AMÉLIORATIONS POSSIBLES	27
CONCLUSION.....	28
RÉFÉRENCES.....	30

RÉSUMÉ EXPLICATIF

Ce rapport présente un projet de design d'une ferme de pleurotes urbaine utilisant de la drêche de brasserie comme substrat afin de valoriser ce sous-produit de la production de bière de la microbrasserie le *Saint-Bock*. Le système expliqué dans ce rapport compte trois principaux appareils innovateurs. Le premier consiste en une chaudière de pasteurisation du substrat multifonctionnelle pouvant également mélanger ce dernier après l'inoculation et permettant de remplir les sacs de culture directement. Le second appareil consiste en une chambre de croissance à environnement contrôlé compacte pour la colonisation du substrat et le troisième consiste en une autre chambre de croissance pour le développement des fructifications. Les profits engendrés sont de 4 415,95 \$ par mois, ce qui permet un remboursement des installations en 9,25 mois.

COMPÉTITION

Ce projet sera soumis pour le concours *Génies en affaire - la route de l'innovation*, concours organisé conjointement par l'ACFAS et les sociétés de valorisation Aligo, Univalor et Sovar.

INTRODUCTION

Le but de la conception du système décrit dans le présent rapport est avant tout de trouver une solution à un problème vécu par le client choisi. Ces détails sont discutés ci-dessous. Le projet est également balisé par plusieurs aspects de la réalité à laquelle fait face le client afin que la solution choisie soit la plus adaptée possible.

Information sur le client

Le projet a été développé en considérant la réalité particulière des microbrasseurs. L'information sur lequel il se base a été obtenue auprès du propriétaire et du brasseur de la microbrasserie Le Saint-Bock, Martin Guimond, et c'est donc à eux qu'il est destiné.

Mentorat

Le projet décrit dans le présent rapport a été réalisé sous la supervision de Dre Valérie Orsat, ingénieure en alimentaire, ayant déjà fait des projets auprès de brasseries.

Répondre aux besoins du microbrasseur

Le besoin auquel tente de répondre ce projet est la valorisation de la drêche du Saint-Bock. Pour résumer la situation, il coûte présentement 200 \$ par mois à la microbrasserie pour se départir de sa drêche de brasserie (DDB). Étant donné le petit volume produit et la grande variabilité (plusieurs types de bières sont produits par le Saint-Bock), la rentabilisation de ce sous-produit est moins évidente que pour les grandes brasseries. Il s'agit donc ici de retourner cette situation et de transformer la DDB en une source de profit. Après recherches, l'option la mieux adaptée au Saint-Bock est de l'utiliser comme substrat pour la croissance de champignons.

Afin que la solution finale proposée cadre le mieux possible avec la réalité du client, le projet doit être balisé par les critères et contraintes ci-bas.

Bilan économique

D'abord, de manière évidente, le bilan économique du projet devra être positif à long terme, c'est après tout le but initial du projet.

Empreinte environnementale

Le client a aussi mentionné vouloir limiter le plus possible son empreinte environnementale, c'est donc un aspect qui a influencé certaines décisions prises lors de la conception.

Adaptation au débit massique de DDB

Le système est également adapté à la production de drêche du Saint-Bock. Ainsi, l'équilibre de masse est un élément crucial de la conception et considère la quantité de DDB produite par semaine, son temps de rétention au sein du système (temps nécessaire pour faire croître les champignons), la masse de champignons produite et la masse de substrat usé. C'est un débit entrant de 200 kg de drêche par semaine qui sera considéré (voir la section *Débit massique de drêche et temps de rétention à l'intérieur du système*). Une fois les champignons récoltés, le substrat usé offre également un potentiel qui est détaillé plus bas et qui fait en sorte qu'en disposer ne devienne pas une dépense supplémentaire (voir la section *Substrat usé*).

Utilisation efficace de l'espace

Nous avons fait de l'optimisation de l'espace une des priorités : ceci implique nécessairement une diminution des coûts mais fait également en sorte que, pour un autre client microbrasseur, le système puisse être installé sur place si la microbrasserie dispose d'un peu d'espace. En outre, nous désirons limiter autant que possible le transport de la drêche jusqu'à l'usine et celui des champignons jusqu'aux clients. Cela implique que les installations se retrouvent possiblement en milieu urbain, et que l'organisation de l'espace doit être intelligente et compacte.

Facilité d'utilisation du système

Il est pris pour acquis que les microbrasseurs n'ont pas nécessairement de connaissances approfondies en mycologie ou qu'ils n'ont pas le budget pour payer un spécialiste. La présente solution a donc été conçue en faisant en sorte de limiter le plus possible le nombre d'étapes pour réduire à un minimum les risques de contamination et optimiser les chances de succès de la production

Détails et limites

La solution conçue est un système complexe dont chaque étape comporte de nombreuses contraintes. Ainsi, nous avons cherché à présenter une vue d'ensemble du système en étant le plus précis possible. Cependant, la quantité de détails est vaste et nous n'avons pu tous les discuter dans un projet pour lequel le temps et les ressources sont restreints. Vue l'envergure du projet, il a été impossible de faire un prototype complet. La partie expérimentation du projet se trouve donc au niveau de tests de culture sur drêche de brasserie afin de vérifier si celle-ci est bien adaptée à l'utilisation que nous comptons en faire (voir section *Expérience de culture sur drêche de brasserie*). La conception s'est basée surtout sur de l'information trouvée dans la littérature scientifique, des calculs et certaines assomptions.

Certains chercheurs ont déjà testé la performance de substrats à base de DDB pour la culture de l'espèce de champignon *Pleurotus ostreatus* et ont eu du succès. De plus, c'est une espèce reconnue pour être très compétitive et facile à faire pousser. C'est pour cette raison que *P. ostreatus*, le pleurote en huître, a été choisi pour concevoir notre système de valorisation de DDB.

ÉTUDE DE MARCHÉ

Une étude effectuée par la firme de marketing Marcon sur les opportunités de développement pour les produits horticoles frais a révélé que les champignons sont parmi les produits alimentaires dont la demande est à la hausse dans le secteur de l'hôtellerie, de la restauration et de l'institutionnel (HRI) (Marcon, 2011).

En effet, la consommation de produits frais chez les Québécois est en hausse depuis 2007, tandis que la consommation de viande, de pommes de terre et de céréales a diminué. Les marques privées ont augmenté leur part du marché au Québec (MAPAQ, 2013). La restauration commerciale génère 78% des ventes de services alimentaires et 53% des produits alimentaires achetés par les Québécois proviennent de producteurs ou de transformateurs de la province (MAPAQ, 2013).

Étant donné que les consommateurs québécois sont plus âgés (1/3 de la population a 55 et plus) et soucieux de leur santé, leur alimentation ne vise plus seulement à assouvir la faim, mais également à prévenir, voire guérir, des maladies. En outre, le goût de l'exotisme encouragé par une ouverture sur le monde et l'immigration se traduit par l'utilisation d'aliments ou d'ingrédients originaux dans de nouvelles recettes. Le consommateur Québécois accorde une importance au prix de ses aliments, mais également à ses caractéristiques. Ce qu'ils cherchent : des aliments faible en gras, en sel et en sucre, ils cherchent des aliments «santé». Ces dernières années, les Québécois ont acheté plus de fruits et légumes. Ils sont soucieux du mode de production et de transformation des aliments et les enjeux environnementaux les poussent à changer leurs comportements alimentaires : ils veulent manger plus local, se soucient du gaspillage, de l'emballage des produits, etc. Cependant, les familles sont plus occupées qu'autrefois et ont peu de temps à accorder à la préparation des repas. Cela les pousse à acheter des mets préparés ou à opter pour des aliments faciles à préparer (MAPAQ, 2013), ainsi une diversification éventuelle de la production par la transformation des champignons (déshydratation, produits à valeur ajoutée, etc.) est à considérer. Cela est expliqué plus en détails dans la section *Améliorations possibles* de ce rapport.

Selon Marcon (2011), cette mutation dans les goûts des Québécois fait en sorte les commerces alimentaires non traditionnels (fruiterie, boucherie, etc.) gagnent du marché au détriment des supermarchés et que le secteur des HRI mise de plus en plus sur l'originalité des plats, la fraîcheur et la saveur. Cela a les impacts suivants sur les préférences du secteur des HRI :

- Désir d'être approvisionné de plus petites quantités à tous les jours
- Adaptation à la saisonnalité des récoltes en favorisant les produits québécois lorsqu'ils sont disponibles
- Recherche des produits locaux afin de diversifier les goûts et couleurs tout en misant dans la mesure du possible sur les fruits et les légumes locaux
- Recherche des produits exotiques tels des fruits et des légumes frais qui procurent une expérience de découverte sensorielle au consommateur
- Préférence pour les achats directement du producteur et chez certains restaurateurs, pour l'approvisionnement exclusif
- Identification de la provenance des produits bioalimentaires locaux utilisés

Les champignons ne sont pas parmi les fruits et légumes les plus achetés au Québec par le secteur HRI, mais ils font partie des aliments de plus en plus en demande (Marcon, 2011). Effectivement, dans les 3 à 5 dernières années, la place accordée aux fruits et légumes sur les menus a augmenté dans le secteur HRI. Cette augmentation est d'autant plus importante chez les traiteurs, où l'offre de fruits et légumes a augmenté de 33 % à 50 %, au détriment de la protéine animale. Marcon (2011) estime que l'offre de fruits et légumes du Québec dans les HRI doit être améliorée en assurant un lien plus direct entre les producteurs et les utilisateurs et en offrant des fruits et légumes non traditionnels.

En somme, compte tenu des tendances remarquées en faveur de produits locaux, frais et exotiques, la production de champignons se présente comme une avenue prometteuse et profitable pour la valorisation

de la drêche de brasserie. Le marché du pleurote est une petite niche, certes, mais la demande est à la hausse et l'offre n'est présentement pas saturée de producteurs locaux.

EXPÉRIENCE DE CULTURE SUR DRÊCHE DE BRASSERIE

Afin de vérifier la vraisemblance de la production de champignons à partir d'un substrat de DDB, des tests ont été faits. Le protocole est décrit ci-dessous.

Huit pots de mycélium de pleurote bleu (*Pleurotus ostreatus* var. *columbinus*) d'environ 1 L (masse inconnue) ont été utilisés pour coloniser les mélanges de substrat. La drêche nous a été fournie par le *Saint-Bock*, de la paille déchiquetée en morceaux de 1 pouce a été obtenue de la ferme de Jérémie Messerli, étudiant en génie des bioressources, et les cultures de *P. ostreatus* var. *columbinus* nous ont été fournies par Nicolas Rondeau, finissant du programme *Farm Management and Technology* de McGill, et Marc Brettschneider. Quatre mélanges de DDB et de paille ont été placés dans huit sacs de plastique autoclavables équipés de filtres stériles. La paille a été choisie à titre comparatif puisque c'est un substrat commun pour la croissance des pleurotes. Les quatre mélanges sont les suivants, en pourcentage massique : 100% DDB, 75% DDB et 25% paille, 50% DDB et 50% paille puis 25% DDB et 75% paille. La DDB et la paille ont été déshydratées au four à micro-ondes afin d'en déterminer le taux d'humidité. En fonction de cette donnée et des mélanges de substrat, de l'eau a été ajoutée aux sacs afin d'obtenir un taux d'humidité final de 70%. Vu la masse volumique très faible de la paille, les sacs contenant un haut pourcentage de paille ont une masse plus faible étant donné que le sac ne pouvait être rempli davantage.

Une fois les substrats placés dans les sacs, ceux-ci ont été autoclavés pendant trois heures, à 121°C. Ils ont par la suite été placés sous une hotte à flux laminaire pour une durée d'environ 12 heures afin de les laisser refroidir.

Les pots de mycélium ont été versés dans chaque sac et ces derniers ont été mélangés légèrement. Ils ont reposé à température ambiante environ deux semaines et des trous ont été faits dans les sacs afin de permettre aux fructifications de croître. Après 21 jours, les premières fructifications ont commencé à apparaître. Nous avons constaté leur apparence inhabituelle, pour chacun des mélanges de substrat (fig. 1). Ce phénomène serait un signe d'excès de CO₂ dans la chambre de croissance, ce qui a été rectifié 23 jours après le début de la période de croissance. Les parties les plus atteintes par cette malformation ont été retirées à ce moment. Elles ont tout de même été considérées dans le calcul de rendement. Suite à une meilleure aération, l'apparence des fructifications toujours présentes a commencé à se transformer pour se rapprocher de l'apparence habituelle de champignons *P. ostreatus* (fig. 1).

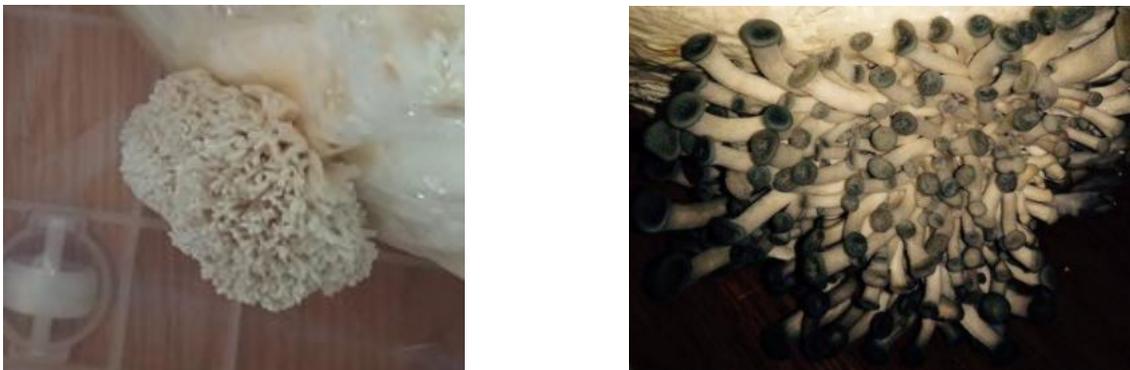


Figure 1. Gauche : Fructification anormale de *P. ostreatus* après 23 jours de croissance. Droite : Changement de l'anatomie des fructifications après l'aération (30^e jour de croissance)

Après le 30^e jour de croissance, les fructifications ont continué à croître et celles arrivées à maturité ont été récoltées afin d’être pesées. Nous avons constaté qu’une partie du substrat (surtout la drêche non mélangée à la paille) n’était toujours pas colonisées par le mycélium. C’est à cela que l’on attribue les signes de contamination qui ont été observés par la suite (fig. 2).



Figure 2. Signes de contamination après 47 jours de croissance : les fructifications ont une teinte orangée et on observe des colonies de moisissure bleue.

Après le 47^e jour, les dernières fructifications ont été récoltées et l’expérience de croissance a pris fin.

Le Tableau 1 montre les résultats obtenus à la suite de cette expérience.

Tableau 1. Résultats de l’expérience de culture de *P. ostreatus* sur substrat de DDB

Type de substrat	Réplicat	Masse totale de substrat (g)	Masse de champignons frais (g)	Rendement* (g de champignons secs/g de substrat sec)
100% DDB	1	2547,2	95,0	1,740%
	2	2138,4	63,7	1,390%
75% DDB, 25% paille	1	1275,3	33,0	1,208%
	2	1275,3	50,2	1,837%
50% DDB, 50% paille	1	754,0	110,9	6,86%
	2	757,4	53,8	3,31%
25% DDB, 75% paille	1	599,6	42,7	3,32%
	2	599,5	28,2	2,20%

*Calculé selon un taux d’humidité du substrat ajusté à 70% et un taux d’humidité théorique des champignons de 86% (Wang *et al*, 2001).

Aucune tendance claire ne peut être extraite de ces données en ce qui a trait à la performance des différents mélanges de substrat. Par ailleurs, les rendements obtenus sont bien en-deçà des résultats

trouvés dans la littérature pour des expériences de culture sur substrat similaire. Nous attribuons cela au fait que la croissance des champignons a été compromise par une trop grande concentration de CO₂ en début de fructification. Ceci aurait mené à un ralentissement de la croissance du mycélium et des fructifications. De plus, il a été observé que dans certains cas, une partie du substrat n'était pas colonisée par le mycélium ce qui aurait permis à des microorganismes indésirables de se développer. Cet ensemble de facteurs expliquerait les faibles rendements obtenus. Cependant, ces résultats ne sont pas réellement fiables pour estimer la production du système puisque cette expérience ne reflète pas les conditions qui prévaudraient à l'intérieur de celui-ci. Avec davantage de temps et de ressources pour effectuer des tests, il aurait été intéressant d'utiliser également un substrat constitué à 100% de paille afin de vérifier si sa productivité est supérieure. En outre, des essais avec des débris de papier et du son de blé pourraient être effectués afin de savoir quel additif est le plus efficace et à quelle proportion. Il s'agissait cependant, d'abord et avant tout, de vérifier la possibilité de faire croître des champignons sur de la DDB en obtenant une productivité raisonnable et cela, l'expérience le démontre bien.

DÉBIT MASSIQUE DE DRÛCHE ET TEMPS DE RÉTENTION À L'INTÉRIEUR DU SYSTÈME

Selon Martin Guimond, propriétaire du Saint-Bock, la microbrasserie produit approximativement 50 m³ de bière par année à raison de 0 à 3 m³ par semaine, et donc entre 100 et 400 kg de drêche sont générés chaque semaine (Guimond, communication personnelle, décembre 2015; Bouchard, communication personnelle, mars 2016). Bien que la production ne soit pas parfaitement constante, le Saint-Bock produit généralement 1 m³ de bière par semaine et les semaines de forte production sont généralement précédées et suivies de semaines sans production. Ainsi, puisque 1 m³ de bière génère environ 200 kg de DDB (Reinold, 1997), le système a été conçu pour un flux constant de 200 kg de DDB par semaine.

L'efficacité biologique est un indice permettant de définir le rendement de champignon qu'il est possible d'obtenir avec un substrat. L'efficacité biologique peut être définie comme le rendement de fructifications fraîches obtenu par 100 g de substrat sec, mais, dans ce rapport, le ratio de la masse sèche de fructification obtenue sur la masse initiale sèche de substrat est utilisé. Afin d'augmenter l'efficacité biologique de *P. ostreatus* lorsque cultivé sur de la DDB, il est possible de faire un amendement au substrat. D'abord, la DDB peut être mélangée avec une source plus concentrée de carbone telle que de la paille de blé, du son de blé ou des retailles de papier recyclé. Dans la littérature, *P. ostreatus* cultivé sur un substrat constitué uniquement de papier offre une efficacité biologique de 15 % (Mandel *et al.* 2005), de 7,12% sur de la paille de blé (Kurt et Buyakalaca, 2010) et de 3% sur de la DDB (Wang *et al.*, 2001), alors que dans tous les cas, l'ajout de son de blé augmentait substantiellement le rendement (Kurt et Buyakalaca, 2010; Wang *et al.*, 2001; Stamets, 2000). Puisque les rendements de *P. ostreatus* sur un substrat combiné de DDB et de son de blé sont disponibles, c'est ce qui sera utilisé pour les calculs de volume et de rendement dans ce rapport. En outre, du gypse doit être ajouté au substrat afin de stimuler la croissance mycélienne du champignon. En effet, l'addition de gypse au substrat, à raison de 3% de la masse humide de ce dernier, augmente indirectement le rendement puisqu'il permet d'accélérer la colonisation du substrat, ce qui augmente le nombre de récoltes avant que la contamination du substrat ne soit trop importante, et d'obtenir de plus grosses fructifications (Stamets, 2000; Thongsook et Kongbangkerd, 2011).

Lorsque Wang *et al.* (2001) ont expérimenté la croissance de *P. ostreatus* sur la DDB, ils ont testé plusieurs ratios de DDB/son de blé dans le substrat. Ainsi, ils ont observé que des champignons cultivés sur un substrat constitué à 100% de DDB ont une efficacité biologique de 3%, et que l'efficacité biologique maximale, 19%, est obtenue avec un substrat constitué à 55% de DDB et 45 % de son. Au-delà de cette

concentration, l'efficacité biologique de *P. ostreatus* diminue. La concentration de 30% de son de blé a été sélectionnée puisqu'elle offre une efficacité biologique de 17%, ce qui n'est que 2 % en deçà du rendement qu'offre un substrat constitué à 45% de son.

L'expérimentation que nous avons présentée dans la section *Expérimentation de culture sur drêche de brasserie* devra être refaite avec de la paille, du papier ainsi que du son de blé, et ce, avec les améliorations indiquées dans cette même section. Ainsi, il sera possible de déterminer la source de carbone et la proportion les plus profitables à intégrer au substrat, selon la souche de *P. ostreatus* que nous utiliserons. Étant donné le peu de littérature disponible sur la culture de champignons sur substrat de drêche de brasserie, les calculs de ce rapport ont été basés avec un substrat additionné de son de blé à 30% de (matière sèche) puisque une étude testant ce substrat est disponible.

Préparation du substrat

Le substrat est constitué de DDB (70% de masse sèche) et de son de blé (30% de masse sèche). Le blanc de champignon y est ajouté après la pasteurisation (8% de la masse humide du substrat) et le gypse y est également incorporé (3 % de la masse humide du substrat).

Variables :

Masse de drêche entrant par semaine : $m_{dh} = 200 \text{ kg}$

Densité apparente de la drêche : $DA_d = 921,06 \text{ kg/m}^3$ (Tapco Inc., 2016)

Teneur en eau de la drêche : $M_d = 0,70 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{drêche}}$

Proportion de son de blé dans le substrat, basé sur la masse sèche : $p = 0,3$

Densité apparente du son de blé : $DA_s = 256 \text{ kg/m}^3$ (Anval, 2016)

Teneur en eau du son de blé : $M_s = 0,12 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{son}}$

Masse sèche de DDB (m_{ds}) :

$$m_{ds} = (1 - M_d) * m_{dh} = (1 - 0,70) * 200 \text{ kg} = 60 \text{ kg}$$

Volume de drêche (V_d) :

$$V_d = \frac{m_d}{DA_d} = \frac{200 \text{ kg}}{921,06 \text{ kg/m}^3} = 0,217 \text{ m}^3$$

Masse humide de son de blé à ajouter (m_{sh}) :

$$m_{sh} = \frac{p * m_d * (1 - M_d)}{1 - M_s} = \frac{0,3 * 200 \text{ kg} * (1 - 0,70)}{1 - 0,12} = 20,45 \text{ kg}$$

Volume de son de blé ajouté (V_s) :

$$V_s = \frac{m_s}{DA_s} = \frac{20,45 \text{ kg}}{256 \text{ kg/m}^3} = 0,0799 \text{ m}^3$$

Après la pasteurisation dans la chaudière, le substrat est égoutté jusqu'à l'obtention d'une humidité de 70% pour tout le substrat. Étant donné que la drêche a un taux d'humidité initial de 70%, seule la masse d'eau amenant le son de blé de 12% à 70% d'humidité est considérée.

Masse d'eau ajoutée pour obtenir du son de blé à 70% d'humidité (m_{eau}) :

$$m_{eau} = (\text{masse finale d'eau}) - (\text{masse initiale d'eau})$$

$$m_{eau} = \left((1 - M_s) * m_s * \frac{0,70}{1 - 0,70} \right) - (M_s * m_s)$$

$$m_{eau} = \left((1 - 0,12) * 20,45 \text{ kg} * \frac{0,70}{1 - 0,70} \right) - (0,12 * 20,45 \text{ kg}) = 39,55 \text{ kg}$$

Masse humide totale du substrat (m_{tot}) :

$$m_{tot} = m_s + m_d + m_{eau} = 200 \text{ kg} + 20,45 \text{ kg} + 39,55 \text{ kg} = 260 \text{ kg}$$

Le volume de blanc (V_b) à ajouter est de 1 L de blanc pour 15 L de substrat, donc 1/15 du volume du substrat (Stamets, 2000). Le volume d'eau n'est pas ajouté puisqu'on fait l'hypothèse que l'eau va remplir les interstices entre les grains de son :

$$V_b = \frac{V_d + V_s}{15} = \frac{0,217 \text{ m}^3 + 0,0799 \text{ m}^3}{15} = 0,0198 \text{ m}^3$$

Masse de blanc à ajouter (m_b) :

La densité du blanc de *P. ostreatus* a été déterminée selon les dimensions d'un distributeur qui vend 1,9 kg de blanc dans des sacs cylindriques 10 cm de diamètre par 30 cm de long, ce qui donne une densité de $DA_b = 806,39 \text{ kg/m}^3$.

$$m_b = V_b * DA_b = 0,0198 \text{ m}^3 * 806,39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 15,97 \text{ kg}$$

Masse de gypse à ajouter (m_g) :

$$m_g = 0,03 * m_{tot} = 0,03 * 220,45 \text{ kg} = 6,75 \text{ kg}$$

Densité apparente du gypse : $DA_g = 865 \text{ kg/m}^3$ (Powder Handling, 2016)

Humidité du gypse : $M_g = 0,3\%$ (Delmhosrt, 2016)

Cette valeur fait en sorte que l'humidité du gypse sera négligée dans l'équilibre de masse du système.

Volume de gypse à ajouter (V_g) :

$$V_g = \frac{m_g}{DA_g} = \frac{6,75 \text{ kg}}{865 \text{ kg/m}^3} = 0,0078 \text{ m}^3$$

Volume total du substrat auquel le gypse et le blanc ont été ajoutés (V_{tot}) :

$$V_{tot} = V_d + V_s + V_b + V_g = 0,217 \text{ m}^3 + 0,0799 \text{ m}^3 + 0,0198 \text{ m}^3 + 0,0078 \text{ m}^3 = 0,305 \text{ m}^3$$

Masse totale du substrat auquel le gypse et le blanc ont été ajouté (m_{tot}) :

$$m_{tot} = m_d + m_s + m_{eau} + m_b + m_g = 200 \text{ kg} + 20,45 \text{ kg} + 39,45 \text{ kg} + 6,75 \text{ kg} + 15,97 \text{ kg}$$

$$m_{tot} = 282,71 \text{ kg}$$

En résumé, 20,45 kg de son de blé à 12% d'humidité sont ajoutés aux 200 kg de drêche hebdomadaires puis le mélange est pasteurisé. Après la pasteurisation, le substrat est amandé avec 6,75 kg de gypse et inoculé avec 15,97 kg de blanc de champignon, puis le tout est mélangé (fig. 3).

Évaluation du rendement

Wang *et al* (2001) évaluent la perte de masse sèche de substrat à 50%. Cette proportion élevée est due à la grande quantité de dioxyde de carbone produite par la respiration du champignon lors de sa consommation du substrat (Stamets, 2000). Ainsi, la perte de masse du substrat se traduit par des émissions de dioxyde de carbone ainsi que la formation de fructifications. En se fiant à l'expérience faite par Wang *et al* (2001), 170 grammes de masse sèche de champignon devrait être obtenue par kilogramme de masse sèche de substrat.

Efficacité biologique de *P. ostreatus* : $EB = 17\%$ (Wang *et al*, 2001)

Masse sèche de *P. ostreatus* produite ($m_{champ.s}$) :

$$m_{champ.s} = EB * (m_{ss} + m_{ds}) = 0,17 * (18,00 \text{ kg} + 60 \text{ kg}) = 13,26 \text{ kg}$$

Teneur en eau de *P. ostreatus* : $M_{champ} = 86\%$ (Wang *et al*, 2001)

Masse humide de *P. ostreatus* produite ($m_{champ.h}$) :

$$m_{champ.h} = \frac{m_{champ.s}}{(1 - M_{champ})} = \frac{13,26 \text{ kg}}{(1 - 0,86)} = 94,71 \text{ kg}$$

En comparaison, *P. ostreatus* cultivé dans un substrat n'ayant pas eu d'amendement en son de blé a une efficacité biologique de $EB' = 3\%$, ce qui donne le rendement hebdomadaire suivant :

$$m'_{champ.h} = \frac{EB' * m_{ds}}{(1 - M_{champ})} = \frac{0,03 * 60 \text{ kg}}{(1 - 0,86)} = 12,86 \text{ kg}$$

Ainsi, on observe qu'un amendement approprié permet d'augmenter considérablement la récolte

Masse sèche de substrat usé à 70% d'humidité (m_{subst}) restante après la culture des champignons si 50% de la masse sèche initiale a été convertie en CO_2 et en matière organique dans les champignons (Wang *et al*, 2001):

$$m_{subst.s} = 0,5 * ((1 - M_s) * m_{sh} + m_{ds}) = 0,5 * ((1 - 0,12) * 20,45 \text{ kg} + 60 \text{ kg}) = 39,00 \text{ kg}$$

$$m_{subst.h} = \frac{0,7 * 78 \text{ kg}}{1 - 0,7} = \frac{0,7 * m_{subst.s}}{1 - 0,7} = 91 \text{ kg}$$

En somme, 94,71 kg de pleurotes frais, soit 13,26 kg de masse sèche, peuvent être retiré des 80,45 kg de masse sèche de son et de drêche à chaque semaine. En outre, le substrat usé dont il faut disposer à la fin a perdu 50 % de sa masse sèche s'étant transformé en dioxyde de carbone, en vapeur d'eau et en fructifications récoltées. De cette manière, la masse sèche finale du substrat est de 39 kg et, en faisant l'hypothèse que le substrat usé a une teneur en eau de 70%, cela représente une masse humide 91 kg (fig. 3).

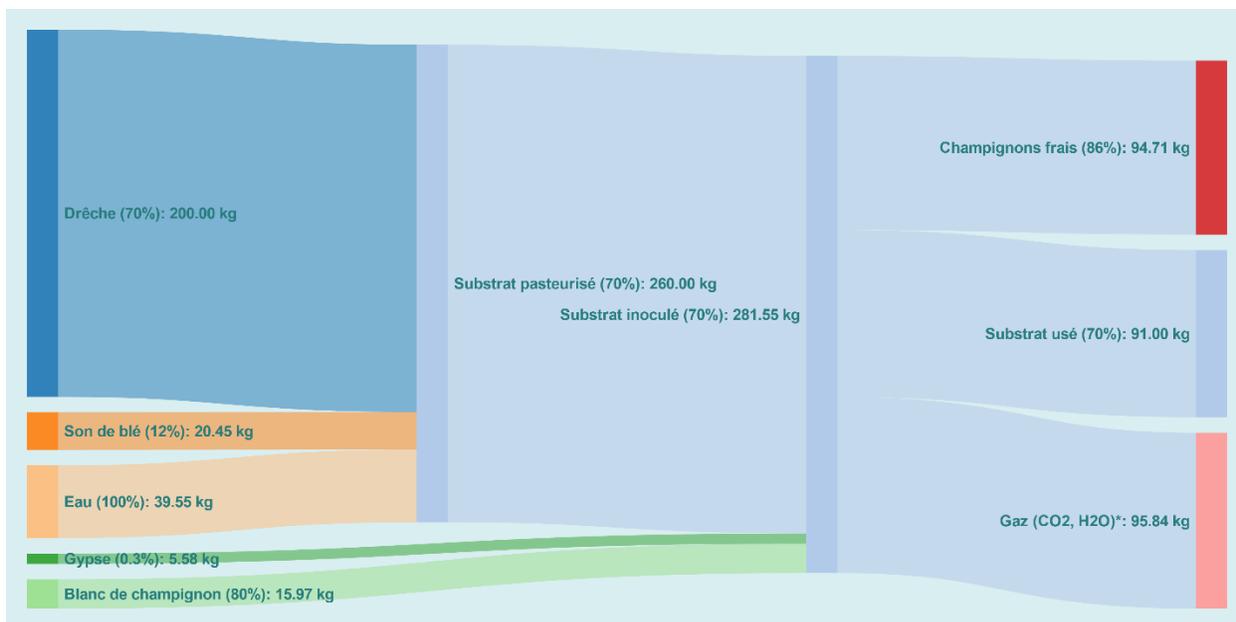


Figure 3. Diagramme du transfert de mass

Les pourcentages entre parenthèses représentent la teneur en eau.

*La quantité exacte de gaz produit n'est pas connue, alors la valeur de 95,84 kg est arbitraire.

COMPOSANTES DU SYSTÈME

Système de pasteurisation et remplissage de sacs

Afin de limiter les coûts, la pasteurisation du substrat a été choisie plutôt que la stérilisation qui demande l'application de pression et de chaleur élevées. C'est d'ailleurs cette méthode qui est employée dans l'industrie. Ainsi, de l'énergie sera économisée et un important temps d'attente pour le refroidissement sera évité. La méthode choisie se fait sans chaleur, grâce à un bain de chaux (hydroxide de calcium, Ca(OH)₂). L'eau de trempage se prépare en dissolvant 0,5% à 1% de chaux (pourcentage massique) dans l'eau. L'eau de trempage sera préparée avec 1% de chaux afin de s'assurer qu'un maximum de microorganismes soit éliminé. À ce moment, le pH de l'eau s'élève à 9,5 ou plus et le substrat y est immergé. Cet environnement alcalin a pour effet d'éliminer les microorganismes sensibles aux pH élevés. Après un trempage d'environ 8 heures, le substrat est drainé. Le mycélium du genre *Pleurotus* peut tolérer ce pH élevé mieux que la plupart de ses compétiteurs. Le pH descend peu à peu à mesure que le mycélium se répand et sécrète des acides et enzymes (Stamets, 2000). La chaux aurait également l'avantage de fournir un apport en calcium au substrat, ce qui est bénéfique pour les champignons (Rondeau, communication personnelle, février 2016).

Ce sous-système de pasteurisation prendrait la forme d'une grande chaudière à double paroi possédant une base en forme de cône inversé pour qu'elle soit vidée plus aisément. Ce qui semble le plus simple est donc d'utiliser une chaudière de fermentation pour la bière, ayant déjà cette forme (fig. 4). Le format de 500 L est parfait pour accueillir le volume hebdomadaire de drêche, en plus des additifs, et de l'eau de trempage tout en laissant de l'espace entre les deux parois.

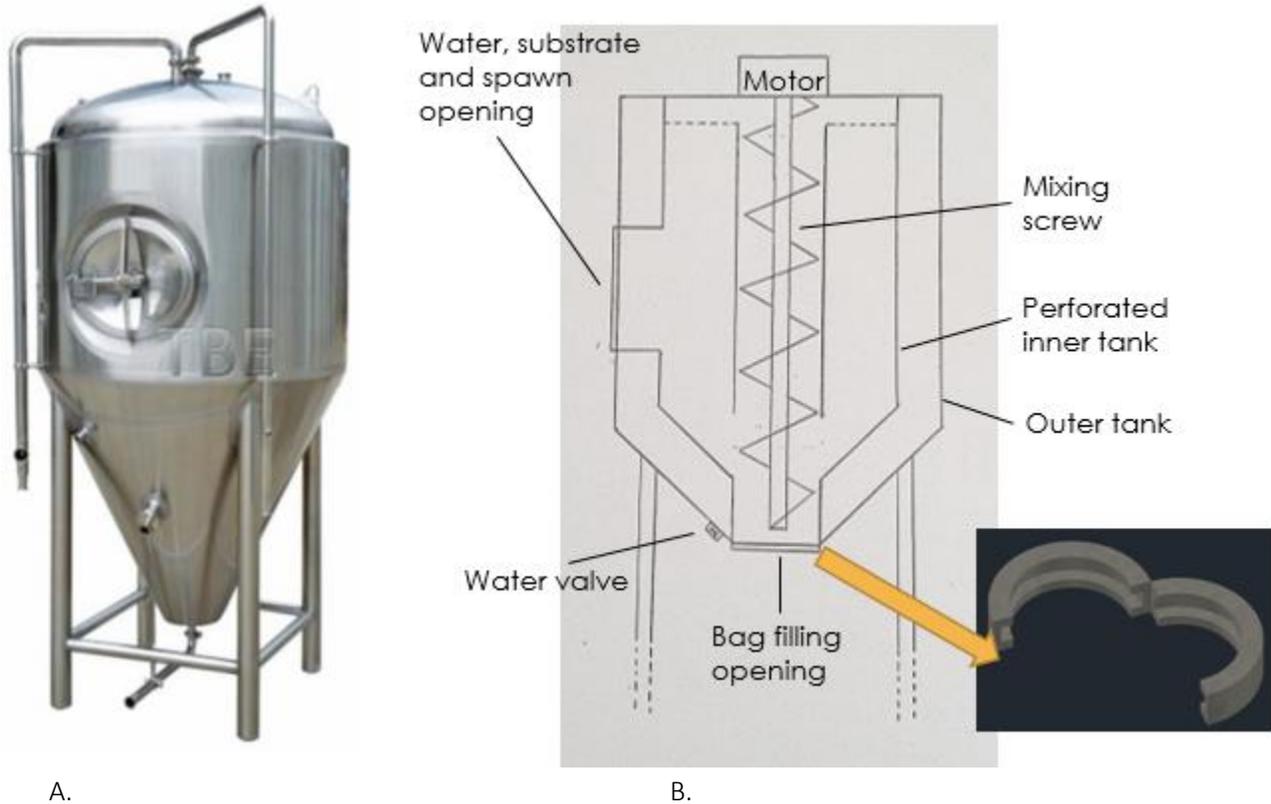


Figure 4. A. Chaudière de fermentation de 500 L à modifier¹. B. Chaudière de pasteurisation modifiée

Il faudra y insérer un récipient intérieur qui soit perforé de petits trous qui serviront à laisser l'eau s'égoutter suite à la pasteurisation, tout en retenant le substrat. La chaudière pourra être remplie (de substrat, d'eau de trempage et de mycélium) via la porte circulaire présente sur le devant de la chaudière. Étant donné la masse importante de drêche à charger dans la chaudière, ceci sera fait à l'aide d'un convoyeur. Il faudra modifier la base de la chaudière afin qu'il y ait une grande ouverture circulaire permette le transfert de la DDB aux sacs de croissance. Sous cette ouverture, un anneau métallique de 25 cm de diamètre (diamètre des sacs) pourra s'ouvrir pour y accrocher les sacs (munies d'un anneau métallique compatible) pour le remplissage (fig. 5). La valve déjà présente à la base de la chaudière devra être déplacée sur le côté, ce sera par là que l'eau de pasteurisation sera évacuée. Au centre de la chaudière, il faudra ajouter une grosse vis (de diamètre tout juste plus petit que l'ouverture à la base) qui, activée en sens anti-horaire fera remonter le substrat vers le haut afin de le mélanger et qui, activée en sens horaire pousse le substrat vers le bas afin de remplir les sacs de croissance. Cette vis pourra tourner grâce à un moteur électrique placé sur le dessus. Le cadre de support devra être modifié également afin de favoriser un remplissage aisé des sacs et l'ensemble de ce système devra être surélevé d'environ 2 mètres pour laisser la place nécessaire pour passer les sacs sans qu'ils touchent le sol.

¹ Provenance de l'image : http://www.beermachinery.com/en/data/images/product/20140302162624_657.jpg

Système de sacs sur rails pour la période de croissance complète jusqu'à fructification

Afin de composer avec un petit débit constant de DDB entrant dans la ferme à chaque semaine, un système de sacs sur rails a été conçu. Ce système de rails horizontaux a l'avantage de permettre une circulation constante des sacs au travers des étapes de croissance. Chaque chambre de croissance présentée plus bas a son propre système de rails permettant d'introduire de nouveaux sacs au fur et à mesure que d'autres en sont extraits. En outre, un rail mobile assurera le transfert des sacs entre les principaux appareils de l'usine.

Nombre de sacs selon le débit massique de DDB

Dimensions des sacs :

Les dimensions des sacs ont été déterminées de manière à obtenir une quantité raisonnable de sac d'une longueur adéquate. Pour se faire, des diamètres de 15, 20 et 25 cm ont été considérés. Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 2. Voici un exemple de calcul basé sur l'utilisation de sacs ayant un diamètre de $D = 15$ cm.

Surface transversale (A) :

$$A = \pi * \left(\frac{D^2}{4}\right) = \pi * \left(\frac{0,15^2}{4}\right) = 0,0177 \text{ m}^2$$

Longueur totale de tous les sacs (L):

$$L = \frac{V_{tot}}{A} = \frac{0,305 \text{ m}^3}{0,0177 \text{ m}^2} = 17,25 \text{ m}$$

Ainsi, si quatre sacs sont utilisés, chaque sac devrait avoir une longueur de $L_4 = 4,31$ m alors que si huit sacs sont utilisés, chacun d'entre eux devrait avoir une longueur de $L_8 = 2,16$ m.

Tableau 2. Longueur des sacs de culture selon leur diamètre et leur nombre

Diamètre des sacs (m)	0,15	0,2	0,25
Aire transversale des sacs (m ²)	0,0177	0,0314	0,0491
Longueur totale de tous les sacs (m)	17,25	9,70	6,21
Pour 4 sacs, longueur de chaque sac (m)	4,31	2,43	1,55
Pour 8 sacs, longueur de chaque sac (m)	2,16	1,21	0,78

Les sacs de 15 cm de diamètre ne seront pas utilisés en raison de leur longueur trop importante (4,31 m pour quatre sacs ou encore 2,16 m pour huit sacs). Aussi, les huit sacs de 20 cm de diamètre et 1,21 m de longueur ne sont pas sélectionnés puisque la manipulation de huit sacs complique les opérations pour les employés. Compte tenu des résultats obtenus, quatre sacs de 25 cm de diamètre et de 1,55 m de longueur sont sélectionnés pour contenir les 0,305 m³ du mélange de substrat hebdomadaire.

Conception des sacs

Les sacs seront fabriqués à partir d'un textile imperméable et très résistant. Ils seront munis d'un anneau en métal à leur ouverture afin de pouvoir les accrocher à la chaudière de remplissage. Une courroie cousue

sur toute la longueur du sac (pour une meilleure solidité) sera repliée sur le haut afin d'accrocher les sacs sur les rails pour la période de croissance. Le détail d'un sac est présenté dans la figure 5.

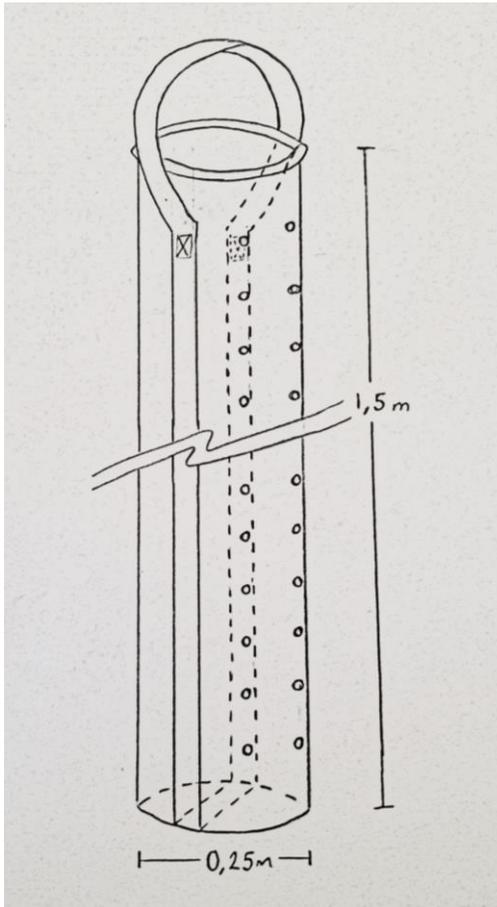


Figure 5. Schéma représentant les sacs de croissance de champignons

Ces sacs devront être pasteurisés avant d'y mettre le substrat et il a été déterminé que le moyen le plus simple de faire tremper les sacs dans la même solution que celle déjà utilisée pour pasteuriser le substrat, c'est-à-dire, une solution à 1% de chaux. Le temps de trempage sera le même (8 heures) ce qui permettra aux sacs d'être prêts au même moment que le substrat. Après rinçage, ils pourront donc être remplis directement, ce qui ne leur laissera pas le temps d'accumuler des contaminants.

Choix des matériaux pour les rails

Les rails supportant les sacs dans la chambre de croissance du mycélium ont une longueur de 1,50 m et doivent supporter un maximum de quatre sacs. Dans le cas de la chambre de croissance pour la formation des primordia et le développement des fructifications, les rails doivent avoir une longueur de 4,70 m et doivent supporter un maximum de dix sacs. Les rails sont faits de deux petites poutrelles en I faites d'acier inoxydable pour éviter la corrosion. Ces poutrelles ont une largeur de 2,33'' et une hauteur de 3''. La courroie du sac est supportée par un crochet relié à deux roues reposant sur les poutrelles (fig. 6).



Figure 6. Rails supportant les sacs de croissance

Un rail mobile est également fabriqué selon le même principe. Ce rail d'une longueur de 1,50 m et pouvant transporter quatre sacs de croissance à la fois permet leur transfert de la chaudière à pasteurisation à la première chambre de croissance et d'une chambre de croissance à l'autre.

Chambre de croissance à atmosphère contrôlée pour la propagation du mycélium

Dimensions de la chambre

Cette chambre de croissance est conçue pour accueillir deux semaines consécutives de grande production avec 400 kg de DDB, ce qui est l'intrant maximal possible. Les sacs de culture doivent rester deux semaines dans la chambre de propagation du mycélium (Stamets, 2000). Cela signifie que la chambre doit pouvoir accueillir 800 kg de DDB avec les amendements présentés précédemment (Section *Préparation du substrat*), donc $V_{\text{myc}}=1,22\text{m}^3$. La chambre de croissance du mycélium est donc en mesure d'accueillir quatre rangs de quatre sacs (fig. 7).

Les sacs seront disposés sur quatre rails parallèles, un sac entrant sur chaque rail à chaque semaine de manière à permettre leur rotation dans la chambre. Une distance de 10 cm entre les sacs et entre les sacs et les murs de la chambre est suffisante à cette étape (fig. 7).

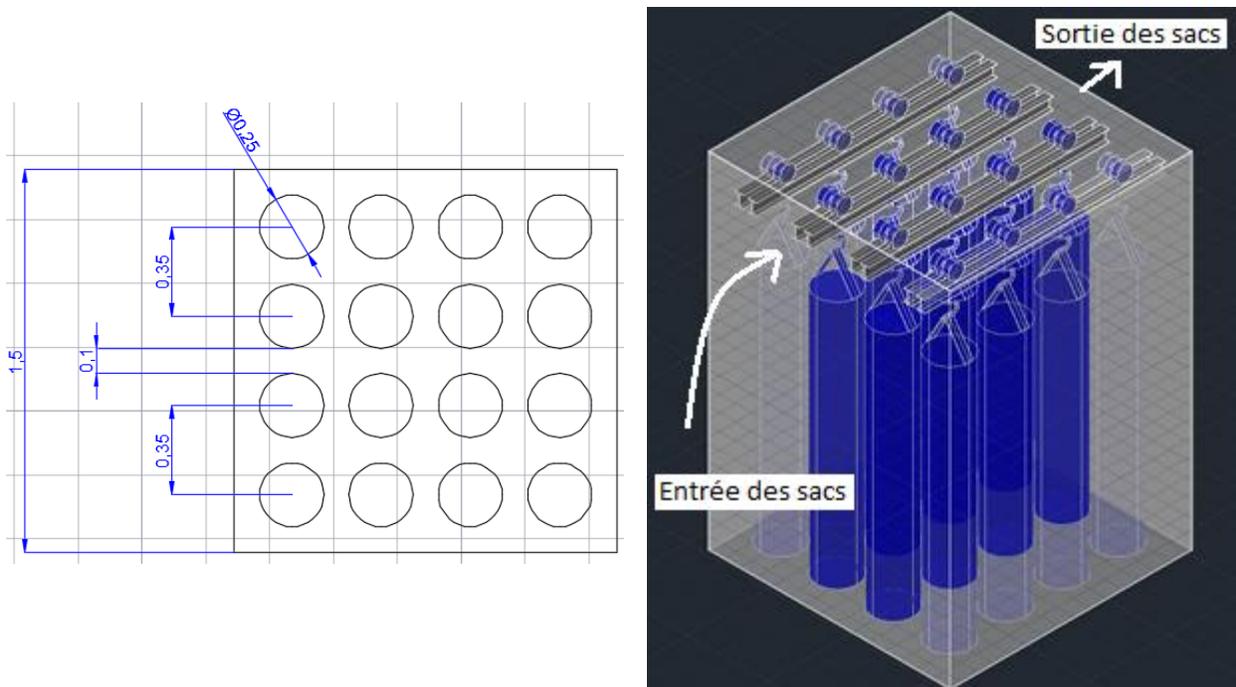


Figure 7. Vue de dessus de la disposition des sacs de culture dans la chambre de croissance du mycélium. Les dimensions sont en mètres.

Puisque 30 cm d'espace sont prévus en dessous et au-dessus des sacs de culture, une hauteur intérieure $H_{c.myc}$ de 2,15 m est prévue.

Largeur de la première chambre de croissance ($L_{c.myc}$) : $L_{c.myc} = 5 * 0,10 \text{ m} + 4 * 0,25 \text{ m} = 1,50 \text{ m}$

Profondeur de la première chambre de croissance ($P_{c.myc}$) : $P_{c.myc} = L_{c.myc} = 1,50 \text{ m}$

Volume intérieur de la première chambre de croissance ($V_{c.myc}$) :

$$V_{c.myc} = L_{c.myc} * P_{c.myc} * H_{c.myc} = 1,50 \text{ m} * 1,50 \text{ m} * 2,15 \text{ m} = 4,84 \text{ m}^3$$

Les murs, le plafond et le plancher de la chambre de croissance sont faits de tôle en acier inoxydable. En outre, la chambre comporte deux grandes portes qui permettent l'insertion des sacs de croissance d'un côté des rails et leur extraction à l'autre extrémité des rails. L'habitable de la chambre est isolé et les portes sont hermétiques, ce qui permet un meilleur contrôle de l'environnement et limite la contamination des sacs de croissance.

Contrôle de l'environnement

Selon Stamets (2000), 1 échange d'air par heure est nécessaire pour une croissance optimale du mycélium de *P. ostreatus* et la concentration de dioxyde de carbone doit se situer entre 5 000 et 20 000 ppm (Stamets, 2000).

Voici la démarche permettant d'évaluer les besoins en termes d'échanges d'air :

Cette première chambre de croissance a un volume de $4,84 \text{ m}^3$ et l'espace occupé par les sacs est un peu plus de $16 * 0,076 \text{ m}^3 = 1,22 \text{ m}^3$. Bien que le volume des sacs représente une importante part de la chambre de croissance (25%), un échange d'air de $4,84 \text{ m}^3/\text{h}$ est tout de même considéré, puisqu'il est possible

qu'elle contienne moins de 16 sacs. Il s'agit d'un très petit volume d'air déplacé à l'heure, alors l'utilisation d'un ventilateur à basse puissance ne fonctionnant que par intermittence est suffisant. Un petit ventilateur de 20 CFM peut être utilisé.

Puisque les ventilateurs commerciaux peuvent opérer à seulement quelques vitesses prédéterminées, nous faisons le choix de modifier la durée d'opération plutôt que la vitesse.

Temps d'opération par heure (t) :

$$t_{v.myc} = \frac{60 \text{ min}}{h} * \frac{V_{c.myc}}{20 \text{ CFM} * 1,7 \frac{m^3/h}{CFM}} = \frac{60 \text{ min}}{h} * \frac{4,84 \text{ m}^3}{20 \text{ CFM} * 1,7 \frac{m^3/h}{CFM}} = 8,55 \text{ min}$$

Ainsi, le ventilateur de la chambre de croissance du mycélium devra fonctionner environ 9 minutes par heure pour assurer un échange d'air de 4,84 m³/h. L'ouverture de la prise d'air de ce ventilateur devra être équipée d'un filtre qui sera changé régulièrement afin de limiter les entrées de contaminants aériens dans la chambre de croissance. La sortie d'air est également munie d'un filtre puisque des contaminants pourraient aussi rentrer par là.

Pour ce qui est du de dioxyde de carbone, un senseur permettra de vérifier que la concentration reste dans la plage optimale. Le modèle de base offre une plage de lecture de 0 à 10 000 ppm et les senseurs pouvant lire de plus hautes concentrations valent beaucoup plus cher. C'est pourquoi, c'est un senseur 0-10 000 ppm qui est utilisé et le seuil maximal deviendra 10 000 ppm. Si la concentration de CO₂ devenait trop élevée, le ventilateur serait allumé pendant de plus longues périodes de temps afin d'en disposer plus rapidement et si elle devenait trop basse, le ventilateur s'arrêterait afin d'en accumuler davantage. La fonction allumer/éteindre sera implantée grâce à un relais. On ne prévoit pas le besoin de rajouter du CO₂ par une source externe puisque les champignons en produiront déjà. La coordination entre le senseur et l'échangeur d'air pourra se faire à l'aide d'un programme simple inscrit dans un microcontrôleur. Une valeur arbitraire de 8 000 ppm pourra être établie comme cible et le délai entre la lecture de la concentration atmosphérique de CO₂ et son ajustement par la ventilation fera en sorte que celle-ci oscillera autour de cette valeur. Il est donc assumé que ce système sera en mesure de maintenir la concentration optimale de dioxyde de carbone dans la chambre de croissance entre les seuils minimum et maximum.

L'étape doit se faire à 24°C et à 85-95% d'humidité (considérons 90%) (Stamets, 2000).

L'humidité devra constamment être réajustée puisque les échanges d'air feront sortir de l'air humide de la chambre de croissance alors qu'ils feront rentrer de l'air de l'extérieur à différents taux d'humidité. Le contrôle de l'humidité pourra se faire grâce au microcontrôleur déjà utilisé pour le contrôle du CO₂. Celui-ci est connecté à la fois à un senseur d'humidité relative et à un vaporisateur qui envoie de fines gouttelettes d'eau dans l'atmosphère de la pièce. Voici un calcul permettant d'avoir une idée de la quantité d'eau devant être vaporisée dans la chambre selon les conditions extérieures:

Supposons que l'humidité intérieure est à 90%, que la température intérieure est de 24°C et que l'échangeur d'air est réglé à 1 échange d'air par heure. Selon le diagramme psychrométrique², ces conditions équivalent à 17 g d'eau par kg d'air sec. À une température de 24°C, la densité de l'air est de 1,188 kg/m³³. Puisqu'un échange d'air à l'heure équivaut à 4,84 m³ d'air évacués par heure:

$$m_{\text{air, évacuée}} = 4,84 \text{ m}^3 * 1,188 \text{ kg/m}^3 = 5,74992 \text{ kg}$$

² Nautica: http://agrofoodwiki.nl/images/9/9e/Nautica_SI_Psychrometric_Chart_Jan_Coumans.jpg

³ Engineering ToolBox: http://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html

Et: $m_{\text{eau, évacuée}} = 5,74992 \text{ kg} * 17 \text{ g/kg} = 97,74864 \text{ g}$

Supposons que la température extérieure est de 10°C et que le taux d'humidité relative est de 80%. Ceci équivaut à 6,25 g d'eau par kg d'air sec. La masse d'air entrant est égale à la masse d'air sortant, soit 5,9774 kg par heure.

$m_{\text{eau, entrant}} = 5,9774 \text{ kg} * 6,25 \text{ g/kg} = 37,35875 \text{ g}$

La masse d'eau perdue à chaque heure est donc:

$m_{\text{eau, perdue}} = m_{\text{eau, évacuée}} - m_{\text{eau, entrant}} = 97,74864 \text{ g} - 37,35875 \text{ g} = 60,4 \text{ g}$.

Ce sont donc 60,4 g d'eau qui devront être vaporisés dans l'air à chaque heure. Le fonctionnement de cet aspect du contrôle de l'environnement sera inspiré du travail d'un mycologue et programmeur amateur ayant réalisé un tel système pour la production de champignons à partir d'un microcontrôleur. Le montage réalisé sera donc le même que le sien et emploiera un humidificateur ultrasonique, une pompe à air pour aquarium logée dans une boîte hermétique munie d'un filtre à très haute efficacité (THE) (Instructables, 2010). Ce système pourra être démarré et arrêté au besoin à l'aide d'un relais.

Afin de rendre le système efficace, le contrôle de la température sera combiné au contrôle de l'humidité. Puisque la température idéale de cette chambre est de 24°C et que le reste du bâtiment est maintenu à 20°C, les besoins seront en chauffage plutôt qu'en climatisation. Cette chaleur additionnelle sera ajoutée par l'entremise du système d'humidification qui vaporisera de l'eau chaude. Il est assumé que le bâtiment dans lequel sera établi le système possède déjà un chauffe-eau. Puisque la température à l'extérieur de la chambre de croissance restera constante (à 20°C) et que le taux d'humidité ne devrait pas varier significativement en fonction du temps, il est attendu que la température de l'eau pourra rester constante également. Des tests devront être effectués en situation réelle afin de déterminer quelle la température optimale l'eau à vaporiser doit avoir.

Étant donné la petite taille de la chambre de croissance, il est assumé que les conditions sont uniformes partout.

Étant donné qu'une certaine quantité d'eau risque de s'écouler par les trous des sacs de culture, des drains devront être posés au plancher.

À chaque semaine, les sacs de croissance étant suffisamment colonisés sont transférés à la seconde chambre de croissance grâce au rail mobile. Cela laisse de l'espace pour les nouveaux sacs fraîchement inoculés qui doivent demeurer deux semaines la première chambre de croissance.

Chambre de croissance à atmosphère contrôlée pour la formation des primordia et le développement des fructifications

Dimensions de la chambre

Selon Stamets (2000), la période de rétention dans la deuxième chambre de croissance est de 45 à 55 jours, avec trois à quatre récoltes par sac espacées de 7 à 14 jours. Ainsi, un sac de culture devrait rester tout au plus huit semaines dans la deuxième chambre de croissance. Puisque la production de bière est irrégulière, et puisque cette période de rétention est plus longue que celle prévue pour la colonisation du substrat par le mycélium, la chambre est conçue pour accueillir l'équivalent de deux semaines supplémentaires de drêche, soit un total de 10 semaines.

Ainsi, la chambre contient quatre rails qui peuvent contenir 10 sacs chaque. La hauteur est la même que dans la première chambre de croissance ($H_{c.fru}=H_{c.myc}=2,15\text{ m}$) Cette fois, un espace de 20 cm est prévu entre chaque sac pour laisser de la place pour les fructifications et pour éviter que des contaminants ne se propagent d'un sac à l'autre. En outre, deux corridors d'une largeur de 1 m sont prévus dans la chambre pour permettre une circulation lors des récoltes et un accès à tous les sacs (fig. 8).

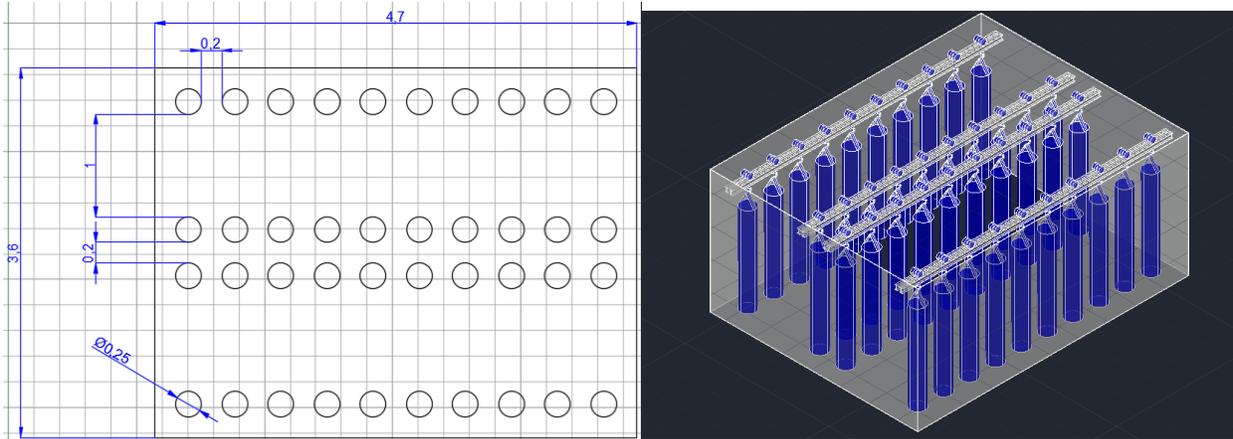


Figure 8. Vue de dessus de la disposition des sacs de culture dans la chambre de fructification. Les dimensions sont en mètre.

Largeur de la deuxième chambre de croissance ($L_{c.fru}$) :

$$L_{c.fru} = 4 * 0,25\text{ m} + 2 * 1,00\text{ m} + 3 * 0,20\text{ m} = 3,60\text{ m}$$

Profondeur de la deuxième chambre de croissance ($P_{c.myc}$) :

$$P_{c.myc} = 11 * 0,20\text{ m} + 10 * 0,25\text{ m} = 4,70\text{ m}$$

Volume intérieur de la deuxième chambre de croissance ($V_{c.myc}$) :

$$V_{c.fru} = L_{c.fru} * P_{c.fru} * H_{c.fru} = 3,60\text{ m} * 4,70\text{ m} * 2,15\text{ m} = 36,42\text{ m}^3$$

Cette chambre-ci est également isolée et munie de portes hermétiques. Tout comme avec la première chambre de croissance, les façades sont faites de tôle en acier inoxydable et deux grandes portes sont encore nécessaires aux extrémités de la chambre. De plus, le même système de rails que celui présent dans la première chambre est employé, mais dans ce cas-ci leur longueur est de 4,7 m.

Contrôle de l'environnement

Cette chambre de croissance abritera les sacs de croissance durant deux périodes de croissance distinctes soient la formation des primordia et le développement des fructifications. Par souci de simplicité et d'économie d'argent, ces deux étapes sont combinées dans une même chambre de croissance. Ce qui nous permet de prendre cette décision est le fait que ces deux étapes demandent des conditions identiques hormis pour l'humidité (Stamets (2000) recommande 95 à 100% d'humidité relative pour la formation des primordia et 85 à 90% pour le développement des fructifications). L'humidité relative sera donc établie à 92,5%, en tant que compromis entre les plages d'humidité suggérées.

Selon Stamets (2000), 4 à 8 échanges d'air par heure sont nécessaires pour une croissance optimale de *P. ostreatus*. Le ventilateur choisi effectuera donc 6 échanges d'air par heure en temps normal, ce qui

pourra être ajusté suite à la lecture de concentration de dioxyde de carbone par un senseur. Ceci assurera ainsi un bon apport en oxygène et l'évacuation du CO₂ dont la concentration maximale recommandée pour cette étape de croissance est de 1 000 ppm (Stamets, 2000). Six échanges d'air à l'heure équivalent à 6 * 36,42 m³/h = 218,53 m³/h. Ainsi, l'utilisation d'un ventilateur ayant une capacité entre 268 et 608 CFM est possible.

$$t_{v.fru} = \frac{60 \text{ min}}{h} * \frac{V_{c.myc}}{20 \text{ CFM} * 1,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = \frac{60 \text{ min}}{h} * \frac{218,53 \text{ m}^3}{268 \text{ CFM} * 1,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 35,34 \text{ min}$$

Ainsi, le ventilateur devra fonctionner environ 35 minutes par heure pour assurer l'échange d'air désiré de 218,53 m³/h. L'entrée et la sortie d'air devront encore une fois être munies de filtres THE pour éviter l'entrée de contaminants.

La concentration atmosphérique de CO₂ dans cette chambre de croissance sera contrôlée de la même manière que pour la chambre de croissance pour la propagation du mycélium. La seule différence se trouvera au niveau de la concentration cible de CO₂ qui sera établie à 500 ppm, valeur moyenne entre 0 et 1 000 ppm.

Encore une fois, le contrôle de l'humidité relative fonctionnera selon le même principe que celui décrit pour la chambre de croissance précédente. L'humidité relative ciblée sera dans ce cas-ci de 92,5%.

Pour ce qui est de la température, Stamets (2000) suggère entre 10 et 15,6°C pour la formation des primordia et entre 15,6 et 21,1°C pour le développement des fructifications. Cette fois-ci, la chambre de croissance devra être climatisée plutôt que chauffée. C'est donc grâce à une petite unité de climatisation munie d'un thermomètre que se fera le contrôle de la température de manière à ce qu'elle soit toujours d'environ 15,6°C.

Étant donné le volume important de cette chambre de croissance, l'utilisation d'un ventilateur à l'intérieur de celle-ci est jugée nécessaire afin d'uniformiser les paramètres environnementaux.

La plupart des champignons sont affectés par la lumière. Celle-ci est responsable d'initier la formation des primordia puisqu'elle avertit le champignon qu'il se situe à l'air libre et donc que ses spores pourront éventuellement être relâchés. Une fois les primordia formés, la présence de lumière empêche les malformations des fructifications, ce à quoi le genre *Pleurotus* est particulièrement sensible. Un manque de lumière est responsable de tiges allongées avec des têtes sous-développées. Des lumières fluorescentes sont utilisées dans les productions intérieures. Pour les périodes de croissance de formation des primordia et de fructification, un flux lumineux par unité de surface de 1 000 à 1 500 lux est recommandé (Stamets, 2000), considérons 1 250 lux. Comme cette chambre de croissance a une superficie de 16,92 m², ce sont 21 150 lumens qui sont nécessaires au total. Étant donné que des tubes fluorescents T5 ou T8 de 32 W émettent 1 600 lumens (GBL, 2015), ce sont 14 tubes qui devront éclairer la pièce. La littérature consultée ne semble pas arriver à un consensus quant à la durée quotidienne de l'éclairage. Pour cette raison, il sera nécessaire de faire des tests pour déterminer la durée optimale d'éclairage. Afin d'évaluer les coûts que cet éclairage représente, considérons pour le moment une durée d'éclairage de 8 heures par jour. En outre, il a été démontré que l'utilisation de lampes ultraviolet-B lors du développement des fructifications de *P. ostreatus* augmente leur teneur en vitamines D₂. En effet, l'installation de lampe UV-B d'une intensité de 1,14 W/m² avec une exposition quotidienne de 94,28 minutes a permis l'obtention d'une teneur optimale de 239,67 µg/g de vitamines D₂ (Wu & Ahn, 2014).

Étant donné qu'une certaine quantité d'eau risque de s'écouler par les trous des sacs de culture, des drains devront être posés au plancher.

Espace d'entreposage

Hormis les espaces nécessaires pour le convoyeur, la chaudière de pasteurisation des sacs et du substrat, pour les chambres de croissance de champignon et pour le réfrigérateur, un certain espace d'entreposage sera nécessaire. Celui-ci servira à entreposer la drêche fraîchement arrivée, avant de la pasteuriser, les sacs de chaux, les additifs pour le substrat (son de blé, paille ou autre ainsi que gypse), les sacs de croissance non utilisés ainsi que le substrat usé, avant d'en disposer. Au moins 5 m² seront nécessaires, mais la superficie finale dépendra surtout de la taille de l'espace disponible et de ce qu'il en restera une fois établies les autres composantes du système.

SUBSTRAT USÉ

Dans une expérience de Wang *et al* (2001), les substrats de drêche de bière ont une teneur plus élevée en protéines une fois utilisés par *P. ostreatus* puisque leur concentration passe en moyenne de 19,9% à 22,9%. Il est donc possible que dans le cas qui nous intéresse, le substrat de DDB usé soit un aliment à valeur ajoutée pour les ruminants. Adamovic *et al* (1998) ont cependant observé une certaine réticence de la part des animaux à consommer ce produit. Il serait cependant intéressant de tester le substrat usé provenant de la méthode de culture décrite dans ce rapport (qui diffère évidemment de celui d'Adamovic *et al* (1998)) afin de voir s'il convient à l'alimentation animale. Peut-être offre-t-il des avantages pour des animaux autres que des ruminants ou peut-être que, mélangé à d'autres ingrédients, il est plus accepté par ces derniers. Si la supériorité de cet aliment par rapport à la DDB est établie, peut-être que certains producteurs seraient prêts à payer une certaine somme pour s'en procurer, ce qui pourrait éventuellement devenir une petite source de profit additionnelle.

ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE

Étant donné que ce projet de design concerne une chaîne complète de production de champignon, beaucoup de défaillances peuvent avoir lieu tout au long du processus. Cette section présente quelques-uns de ces risques de défaillances.

Approche ascendante

L'approche ascendante (*bottom-up*) consiste à analyser un mode de défaillances à partir d'un élément dans la chaîne de production et dont les conséquences possibles sont par la suite énumérées. Par exemple, un problème peut se produire dans la cuve de pasteurisation dans laquelle le substrat doit être pasteurisé pendant une longue période. Le problème pourrait être un défaut dans la chaudière faisant en sorte que l'eau s'évacue, ou encore un mauvais dosage de la chaux qui ne permet pas la création d'un environnement suffisamment alcalin pour éliminer la majorité des microorganismes. Cela peut avoir des effets majeurs vers sur les étapes suivantes du processus. En effet, tout ce lot de production de champignons pourrait devoir être jeté en raison de la contamination. En outre, la contamination pourrait se propager dans les lots précédents et suivants, ce qui aurait entraîné une perte de profit considérable. Dans le même ordre d'idées, si la contamination est très importante, l'usine entière (chambres, espaces de manutention du substrat, etc.) pourraient devoir être bien nettoyée ou même stérilisée, ce qui impliquerait un arrêt complet des activités pendant une période prolongée. Cela représente une perte considérable de revenu, mais il y a également une possibilité de perte de confiance des clients en raison d'un manquement dans les livraisons qui peut mener à la perte d'une partie de la clientèle. Enfin, la pire conséquence envisageable consiste en l'empoisonnement alimentaire de consommateurs, ce qui représenterait une catastrophe pour

leur santé et pour la réputation de l'entreprise. La figure 9 présente une schématisation de cette analyse ascendante.

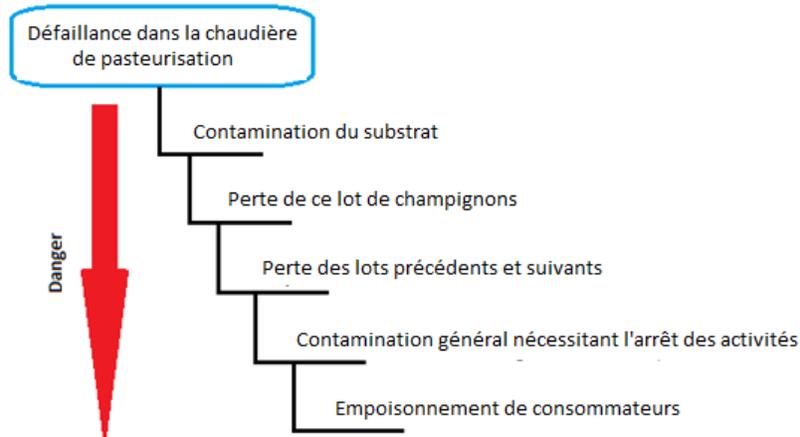


Figure 9. Approche ascendante de l'analyse de défaillance de la chaudière de pasteurisation

Approche descendante

L'approche descendante consiste à analyser la situation en partant des conséquences finales en revenant à la source. Admettons que les champignons obtenu à la fin du processus n'ont pas la forme anticipé (soit petits et trapus ou longs et minces, etc.) Il est alors impératif de chercher les causes probables de ces défauts. D'abord, il faut considérer les facteurs environnementaux de la dernière chambre de croissance. Peut-être que la cause se retrouve dans de mauvaises conditions de température ou d'humidité. Alors une vérification des senseurs et du système d'aération doit être vérifié. En outre, il est possible que le niveau de CO₂ n'ait pas été bien contrôlé, et la source de ce problème pourrait être dans le capteur de CO₂ lui-même ou dans l'instrument de contrôle du ventilateur responsable des échanges d'air. Enfin, il pourrait aussi s'agir d'un défaut dans le système d'éclairage. Ces mêmes vérifications doivent également être effectuées dans la première chambre de croissance. En outre, la forme inhabituelle des champignons peut être due à une contamination du substrat prévenant une bonne colonisation par *P. ostreatus*. De cette façon, il faut inspecter les chambres de culture et les systèmes de ventilation afin de s'assurer qu'aucun contaminant n'y est présent. La chaudière de pasteurisation doit également être examinée attentivement pour s'assurer de son bon fonctionnement. Enfin, cela pourrait être dû à l'inoculation de la mauvaise souche de champignon à la source. En effet, le fournisseur de blanc pourrait avoir fait une erreur dans la commande de sorte que les fructifications pourraient en fait ne pas être de l'espèce désirée. La figure 10 présente une schématisation de cette analyse ascendante.

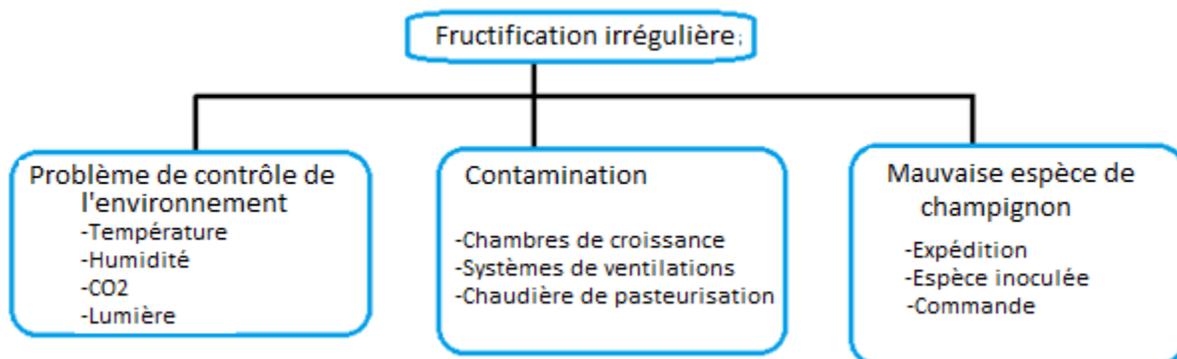


Figure 10. Approche descendante de l'analyse de défaillance de la forme des fructifications

Chaux

La chaux coûte 70 \$ la tonne⁶. Pour les semaines où la quantité de drêche est la plus importante, on considère que la chaudière de pasteurisation de volume utile de 500 L sera remplie de substrat et d'eau de trempage. Si on approxime la masse volumique de ce mélange à 1 kg/L, il y aura 500 kg de matière dans la chaudière. Puisqu'un pourcentage massique de 1% de chaux est nécessaire pour la pasteurisation, ce sont 5 kg par semaine (au plus) qui seront nécessaires et donc environ 21,7 kg par mois. La même quantité est jugée nécessaire pour pasteuriser les sacs de culture. La dépense mensuelle de chaux est donc de 3,04 \$, ce qui est plutôt négligeable.

Additifs pour substrat

Le gypse ajouté au substrat se vend au coût de 100\$ la tonne métrique⁷. Puisque 0,0078m³ de gypse est nécessaire à chaque semaine, les dépenses en gypse sont d'environ 78¢ par semaine, soit 3,40 \$ par mois, ce qui est négligeable. Une tonne de gypse devrait pouvoir durer 128 semaines, ce qui représente un peu moins de 2 ans et demi.

Le son de blé se vend au coût de 138\$ la tonne métrique⁸. Puisque 0,0799 m³ de son est nécessaire par semaine, cela représente une dépense de 11,03\$ par semaine, ou 47,91\$ par mois.

Les dépenses totales pour les additifs au substrat sont donc de 3,40 \$ + 47,91 \$ = 51,31 \$ par mois.

Chaudière pour pasteurisation, mélange et remplissage des sacs

Un convoyeur est nécessaire pour le transport de la DDB jusqu'à la chaudière, celui-ci vaut 1000 \$⁹. La chaudière de fermentation de 500 L pour la bière servant de coûte 2 000 \$¹⁰. Nous prévoyons un montant additionnel de 2 000 \$ pour couvrir le coût des modifications. Ceci inclura la fabrication de pièces sur mesure (dont l'anneau à la base de la chaudière permettant d'accrocher les sacs et les anneaux compatibles sur le haut des sacs) et de la soudure.

Sacs de culture

De la toile de PVC très robuste qui servira à fabriquer les sacs de culture coûte 3,25 \$/m². Étant donné leur diamètre de 0,25 m et leur hauteur de 1,55 m, les sacs (ouverts sur le dessus) ont une superficie de 1,266 m² ce qui sera arrondi à 1,5 m² pour considérer les coutures et les retailles inutilisables. Puisqu'au plus 56 sacs seront nécessaires en même temps, 60 sacs seront fabriqués afin d'en avoir de rechange. La dépense de textile représente donc 292,50 \$. On estime qu'une heure est nécessaire pour fabriquer chaque sac et donc en payant une personne 15 \$/h, on obtient un montant de 900 \$ pour la main d'œuvre.

⁶ Telle que la chaux vendue sur le site Alibaba: http://www.alibaba.com/product-detail/CALCIUM-HYDROXIDE-HIGH-PURITY-HYDRATED-LIME_60298505866.html?spm=a2700.7724857.29.3.NYcros&s=p

⁷ Tel que le son de blé vendu sur le site Alibaba : http://www.alibaba.com/product-detail/High-Quality-White-Gypsum-Powder-and_60302329100.html?spm=a2700.7724857.29.143.fgyB8

⁸ Tel que le son de blé vendu sur le site Alibaba : http://www.alibaba.com/product-detail/Wheat-bran-for-animal-feed_169671315.html?spm=a2700.7724838.0.0.MHGIKO

⁹ Tel que le modèle vendu sur le site Alibaba: http://www.alibaba.com/product-detail/Heat-resistant-chain-conveyor-for-waste_60093495591.html?spm=a2700.7724838.38.1.hthEde

¹⁰ Telles que celles vendues sur le site Alibaba : http://www.alibaba.com/product-detail/500L-Beer-Brewery-brewing-equipment-for_60020787285.html?spm=a2700.7724857.5.1.ktjPFQ&s=p

Système de rails

Chaque rail est constitué de deux poutrelles en I de 3'' par 2,33'' faites d'acier inoxydable. La première chambre de croissance contient quatre rails de 1,50 m de longueur et la seconde chambre contient quatre rails de 4,70 m de longueur. De plus, chaque rail est supporté par deux poutrelles de 2,00 m de longueur.

Les besoins sont les suivants:

- 8 poutrelles horizontales de 1,50 m de longueur pour la première chambre de croissance;
- 8 poutrelles horizontales de 4,70 m de longueur pour la deuxième chambre de croissance;
- 16 poutrelles verticales de 2,00 m de longueur pour supporter les rails des deux chambres de croissance.

Il est possible de se procurer des poutrelles de 6,10 m (20') de longueur. Ainsi, deux poutrelles de 20' doivent être achetées pour la structure horizontale de la première chambre de croissance. Huit grandes poutrelles doivent être achetées pour la seconde chambre de croissance. Enfin, six poutrelles doivent être achetées pour la structure verticale ce qui totalise 16 poutrelles de 20'. Lorsqu'achetées en grande quantité, le coût de chaque poutrelle est de 134,90 \$, ce qui élève le montant à 2 158,40 \$¹¹.

Les deux chambres peuvent accueillir un maximum de 56 sacs de croissance. Étant donné que deux roues sont nécessaires pour chaque sac, un total de 112 roues est nécessaire. Des roues industrielles de 3,00 pouces de diamètre et de 1,25 pouce d'épaisseur et pouvant supporter une masse 113,4 kg (250 lbs) se coûte 3,72 \$ l'unité¹², ce qui donne un total de 416,64 \$ pour toutes les roues. De plus, un budget de 500 \$ est prévu pour les crochets et les jonctions entre les roues, ce qui fait un total de 3 075,04 \$ pour les rails.

Habitacles des chambres de croissance

Vingt-cinq feuilles de tôle faisant 4 pieds par 10 pieds de 0,065 pouce d'épaisseur sont nécessaires pour la fabrication de l'habitable des deux chambres de croissance. Puisque la tôle est faite d'acier inoxydable, il en coûte 298,17 \$ l'unité¹³, ce qui donne un total de 7 454,25 \$ pour les vingt-cinq. Ainsi, un budget de 10 000,00 \$ est alloué pour la fabrication de l'habitable des deux chambres de croissances, ce qui laisse 2 545,75 \$ pour les coûts de l'isolation, du revêtement extérieur et des accessoires pour les portes.

Contrôle de l'environnement

Le ventilateur nécessaire pour la première chambre de croissance coûte 5 \$¹⁴ et celui pour la deuxième chambre de croissance coûte 30 \$¹⁵. Un capteur de dioxyde de carbone coûte 45,40 \$¹⁶. Deux capteurs seront nécessaires, pour les deux chambres de croissances. Un climatiseur à température programmable comme celui qui sera utilisé dans la deuxième chambre de croissance coûte 200 \$¹⁷. Pour le contrôle de l'humidité : un capteur d'humidité (2 nécessaires) coûte 8,99 \$¹⁸, un humidificateur ultrasonique (2

¹¹ Tel que les poutrelles en I vendues sur le site de Metals Depot : http://www.metalsdepot.com/catalog_cart_view.php?msg

¹² Telles que les roues vendues sur le site de Global industrial : <http://www.globalindustrial.ca/p/material-handling/casters/wheels/3-x-1-1-4-polyolefin-wheel-with-ball-bearing-for-3-8-axle-250-lbs-capacity>

¹³ Telles que la tôle vendue sur le site de Metals Depot : http://www.metalsdepot.com/catalog_cart_view.php?msg=removed

¹⁴ Tel que le ventilateur vendu sur le site Alibaba : <http://www.alibaba.com/product-detail/BS2107F-1110-12038-AC-115V-0-60192888784.html?spm=a2700.7724838.0.0.Vux1xK>

¹⁵ Tel que le ventilateur vendu sur le site Alibaba : <http://www.alibaba.com/product-detail/stainless-steel-axial-fan-industrial-exhaust-60076773939.html?spm=a2700.7724838.0.0.Vux1xK>

¹⁶ Tels que ceux vendus sur le site Futurlec : http://www.futurlec.com/Gas_Sensors.shtml

¹⁷ Tel que ceux vendus sur le site Alibaba : <http://www.alibaba.com/product-detail/super-general-air-conditioner-GWH09NA-K3NNB1A-829223714.html?spm=a2700.7724838.0.0.eZIR20>

¹⁸ Tel que ceux vendus par ABRA : <https://abra-electronics.com/robotics-embedded-electronics/parallax-en/parallax-sensors/27920-hs1101-humidity-sensor-27920.html>

nécessaires) pour l'ajustement du taux d'humidité coûte 4,80 \$¹⁹ et une pompe pour aquarium coûte 15,78 \$²⁰ (2 nécessaires). Le ventilateur utilisé pour uniformiser l'air de la chambre coûte 159 \$²¹. Les relais nécessaires pour allumer et éteindre les appareils de contrôle coûtent 7,99 \$ chaque²². Quatre relais seront nécessaires au total. Des filtres THE destinés aux échanges d'air lors de la production champignons suffisamment grands pour ne pas compromettre les entrées d'air coûte 239 \$²³. Deux de ces filtres par chambre de croissance sera nécessaire (un pour l'entrée d'air et un autre pour la sortie). Des tubes fluorescent T8 de 32 W coûtent 12,99 \$²⁴ chaque ce qui représente une dépense de 181,86 \$ pour les 14 tubes nécessaires.

Réfrigérateur

Étant donné la courte durée de conservation des champignons frais, on estime que ceux-ci devront être réfrigérés une fois récoltés. Afin de pouvoir stocker une quantité raisonnable de champignons, une chambre froide de 8 pieds par 8 pieds est choisie (2,43 m x 2,43 m). Le prix est de 2 588 \$²⁵. Une chambre froide a une puissance d'environ 0,107 kW/m³. En supposant que la chambre froide aurait une hauteur minimum de 2,15 m²⁶, la puissance de la chambre froide serait de 1,36 kW. Ceci implique une consommation d'énergie mensuelle de 992,8 kWh/mois.

Substrat usé

Disposer du substrat usé n'est pas considéré comme une dépense ni comme une source de revenu pour les besoins du présent rapport. En effet, il n'est pas garanti qu'il soit d'un intérêt réel pour une autre utilisation et donc qu'il puisse devenir une source de profit. D'autre part, il n'est pas considéré comme une dépense puisque le microbrasseur paierait pour s'en départir s'il ne la valorisait pas et que de toute manière, la masse est diminuée par son utilisation par les champignons.

Ajustements à l'entrepôt existant

Les ajustements possiblement nécessaires de l'espace disponible incluent la création de pièces distinctes pour séparer les étapes de cultures, l'installation de drains au plancher, l'installation de la chambre froide, l'installation de filtres à air, etc. Il est impossible de prédire ces coûts avant de connaître toutes les spécificités du bâtiment choisi. En utilisant des contacts dans le domaine de la construction pour les matériaux et la main d'œuvre, un budget de 20 000 \$ est proposé.

Main d'œuvre

Étant donné que la production de champignons comprend plusieurs étapes et que l'on veut s'assurer que les conditions idéales de croissance soient réunies en tout temps, il serait préférable d'avoir un employé sur place à tous les jours de la semaine, toute la journée. Comme la simplicité du système fait en sorte que

¹⁹ Tel que ceux vendus sur le site Alibaba : http://www.alibaba.com/product-detail/ultrasonic-mist-maker-fogger_60239770658.html?spm=a2700.7724857.29.166.n4cXNc

²⁰ Telles que celles vendues sur le site Amazon : http://www.amazon.com/Hydrofarm-Air-Pump-Outlets-7-8L/dp/B002TCC46U/ref=pd_bxgy_199_img_3?ie=UTF8&refRID=065SGEN9DVVVPKWZVWJC

²¹ Tel que ceux vendus sur le site Growers Supply : https://www.growersupply.com/farm/supplies/prod1;gs_cooling_fans-gs_circulation_fans;pg104668_106569.html

²² Tels que ceux vendus par ABRA : <https://abra-electronics.com/electromechanical/relays/r10-style-relays/r10-105-r10-series-general-purpose-relay-6vdc-2a-spdt-pc-r10-105.html>

²³ Tels que ceux vendus sur le site Fungi Perfecti : <http://www.fungi.com/shop/mushroom-cultivation-tools/laboratory-equipment-supplies/tools-for-air-filtration.html>

²⁴ Tels que ceux vendus par Rona : <http://www.rona.ca/fr/ampoule-fluorescente-t8-32-w-48-po-paquet-de-2-03175428>

²⁵ Telle que le modèle de 8 pieds par 8 pieds vendu par la compagnie ADL : <http://www.goagl.com/pdf/ADL-FR-WEBedition.pdf>

²⁶ Selon les modèles installés par la compagnie ABC Froid : <http://www.abcfroid.com/>

des connaissances mycologiques approfondies ne sont pas nécessaires, on estime pouvoir payer des employés au salaire moyennement élevé de 15 \$/h. Pour 8 heures de travail par jour, 7 jours par semaine, cela revient à une dépense mensuelle de 3 640 \$.

Revenus

Revenus provenant de la vente des pleurotes

Le prix standard pour la vente de pleurotes frais est de 30\$ pour deux livres (Birri, 2016) ainsi, le revenu hebdomadaire engendré par la vente de pleurotes frais peut être calculé:

$$R = \frac{30\$}{2lbs} * \frac{lbs}{kg} * m_{champ.h} = \frac{30\$}{2lbs} * \frac{2,2046 lbs}{kg} * 94,71 kg = 3\ 132,14\$$$

Étant donné que les pleurotes frais non vendus peuvent être séchés et vendus au coût de 3,99\$/14 g (285 \$/kg), alors les 3 132,14 \$ hebdomadaire, soit 13 609,89 \$ par mois, est le revenu minimal possible. Cela impliquerait cependant l'achat d'un déshydrateur et autres instrument de transformation alimentaire.

	<i>Investissement initial (\$)</i>	<i>Coût opérationnel mensuel (\$)</i>	<i>Revenu mensuel (\$)</i>
<i>Énergie</i>	0	2 500,00	N/A
<i>Espace</i>	0	2 500,00	N/A
<i>Culture de champignons</i>	0	499,59	N/A
<i>Chaux</i>	0	3,04	N/A
<i>Additifs pour substrat</i>	0	51,31	N/A
<i>Chaudière pour pasteurisation, mélange et remplissage des sacs</i>	4 000,00	0	N/A
<i>Sacs de culture</i>	1 192,50	0	N/A
<i>Système de rails</i>	3 075,04		
<i>Habitacle des chambres de croissance</i>	10 000,00		
<i>Contrôle de l'environnement</i>	1 713,76	0	N/A
<i>Réfrigérateur</i>	2 588,00	0	N/A
<i>Ajustements à l'entrepôt existant</i>	20 000,00	0	N/A
<i>Main d'oeuvre</i>	0	3 640,00	N/A
<i>Revenus</i>	N/A	N/A	13 609,89
TOTAL	40 855,54	9 193,941	13 609,89

AMÉLIORATIONS POSSIBLES

Le système décrit dans le présent rapport a été élaboré en essayant de minimiser les coûts et surtout avec une expérience limitée dans la culture de champignons. Une fois mis en place, il sera possible de mieux cibler les besoins. De plus, lorsque le système deviendra rentable, un budget sera disponible afin de rendre le système plus efficace. Voici ci-dessous les améliorations que nous prévoyons être les plus pertinentes à ce moment.

Le système de contrôle de l'environnement décrit ci-haut gère le CO₂, l'humidité et la température. Il serait donc intéressant de se procurer un système intégré et automatisé permettant de contrôler toutes ces composantes à la fois. De tels systèmes spécialement conçus pour la production de champignons existent, mais sont très dispendieux et conçus pour des productions à plus grand volume.

Du mycélium déjà préparé est acheté afin de démarrer chaque culture de champignons. Un laboratoire muni d'un autoclave permettant de répliquer le champignon sur place représente un investissement considérable, mais épargnerait au microbrasseur cette dépense répétitive.

Afin de mieux répondre aux besoins du marché, il serait avantageux de produire différentes variétés de champignons. Le genre *Pleurotus* présente déjà plusieurs espèces de grand intérêt et dont les conditions optimales de croissance doivent s'apparenter à celles de *Pleurotus ostreatus*, espèce pour laquelle le système a été pensé. Éventuellement, des tests pourraient être effectués pour tester la performance d'autres genres comme les réputés shiitake (*Lentinula edodes*). Les modifications à apporter au système devraient se trouver au niveau des conditions de croissance et du mélange de substrat.

Un des objectifs principaux du système étant d'être facile à utiliser, la conception a été faite en limitant le plus possible les manipulations. Suite à un certain temps d'utilisation du système, il serait plus facile de voir de quelle manière chaque étape peut devenir plus efficace, corriger les problèmes mineurs. Le système de remplissage des sacs pourrait éventuellement devenir entièrement mécanisé afin d'éliminer les interventions humaines.

Finalement, en plus des champignons frais, la production pourrait s'étendre à la transformation. Ceci nécessiterait l'achat de plusieurs pièces d'équipement comme un déshydrateur, une cuisinière, etc. Ceci permettrait d'offrir des produits à plus longue durée de conservation et de s'adresser à différents consommateurs.

CONCLUSION

En définitive, notre design visait la valorisation de la DDB provenant du *Saint-Bock* qui paie actuellement 200 \$ par mois pour en disposer. Il a été déterminé dans une étude antérieure que la façon la plus profitable de valoriser ce produit résiduel est en l'utilisant comme substrat de croissance pour des pleurotes, car cette espèce de champignon pousse bien dans un substrat ayant la même humidité et composition chimique. C'est donc pourquoi nous avons choisis de concevoir une ferme urbaine de champignon respectant les contraintes et critères suivantes : viabilité économique, faible empreinte écologique, adaptabilité à un petit débit constant de DDB, utilisation efficace de l'espace, conformité aux régulations et normes alimentaires, facilité d'utilisation et adaptabilité à une grande variété de DDB.

Pour résumer les étapes du système, la DDB est d'abord pasteurisée dans une chaudière grâce à de la chaux. Les sacs de croissances sont directement remplis à la chaudière de pasteurisation et transférés à la première chambre de croissance à environnement contrôlé pour la colonisation du substrat. Après deux semaines, les sacs sont transférés à une seconde chambre de croissance où ils resteront pendant quatre semaines pendant lesquelles ils produiront des pleurotes trois ou quatre fois. Après ses quatre semaines, les sacs sont vidés du substrat usé, qui sera disposé tel qu'indiqué dans la section *Substrat usé*, lavés et pasteurisés dans une solution de chaux.

Il est possible de produire 94.71 kg de pleurotes avec les 200 kg de DDB produits par le *Saint-Bock* sur une base hebdomadaire. En considérant les dépenses mensuelles, il sera possible de faire un profit de 4 415,95 \$ par mois. Avec un investissement initial totalisant 40 855,54 \$, la période d'amortissement des installations est de moins de dix mois (9,25 mois).

Les profits engendrés mensuellement ne sont pas énormes. Cependant, étant donné que les chambres de croissance ont été conçues pour un apport en drêche plus important que celui fourni en moyenne par le *Saint-Bock*, il est également possible de prendre la drêche produite par d'autres microbrasseries. Par exemple, avec un approvisionnement additionnel de 200 kg de drêche par semaines, cela représente un profit total de 17 471,90 \$ par mois, soit près de quatre fois le profit actuel. En outre, une cuisine pourrait être aménagée dans le bâtiment afin de sécher une partie des récoltes et de faire de la transformation pour produire des produits de champignons à valeur ajoutée. Il serait également intéressant d'installer un laboratoire dans l'usine qui permettrait la production du blanc de champignon sur place. Bien que cela représente deux dépenses initiales assez élevées pour s'équiper d'un autoclave, d'une hotte verticale à flux laminaire ainsi que d'autres équipements de laboratoire, des économies mensuelles de 499,59 \$ pourraient être évitées. Enfin, il serait intéressant de diversifier la production en intégrant d'autres espèces de champignons. À titre d'exemple, le shiitaké (*Lentinula edodes*), qui est une espèce de champignon croissant dans des conditions et des substrats similaire aux pleurotes, a une très bonne valeur marchande et pourrait facilement être cultivé dans le système présenté dans ce rapport.

RÉFÉRENCES

- Adamovic, M., G. Grubic, I. Milenkovic, R. Jovanovic, R. Protic, L. Sretenovic et L. Stoicevic. 1998. The biodegradation of wheat straw by *Pleurotus ostreatus* mushrooms and its use in cattle feeding. *Animal Feed Science Technology* 71 (3-4): 357-362.
- Anval. 2016. Bulk density. Disponible au : <http://www.anval.net/downloads/bulk%20density%20chart.pdf>. Consulté le 1^{er} mars 2016.
- Birri Marché Jean-Talon. 2016. Pleurote Blanc. Disponible au: <http://www.birri.ca/Pleurotes-Blanc.html>. Consulté le 26 mars 2016.
- Delmhorst. 2016. How to accurately measure moisture in Gypsum wall board. Disponible au : <http://www.delmhorst.com/blog/bid/297751/How-to-accurately-measure-moisture-in-Gypsum-wall-board>. Consulté le 1^{er} mars 2016.
- Green Business Light (GBL). 2015. Lux, lumens and watts. Disponible au: <http://www.greenbusinesslight.com/page/119/lux-lumens-and-watts>. Consulté le 8 avril 2016.
- Instructables. 2010. Mushroom Environment Control – Arduino Powered. Disponible au: <http://www.instructables.com/id/Environmental-Mushroom-Control-Arduino-Powered/?ALLSTEPS>. Consulté le 4 avril 2016.
- Kurt, K., S. Buyakalaca. 2010. Yield performances and changes in enzyme activities of *Pleurotus* spp. (*P. ostreatus* and *P. sajor-caju*) cultivated on different agricultural wastes. *Bioresource Technology* 101: 3164-3169
- MAPAQ. 2013. Bottin statistique de l'alimentation. MAPAQ référence No 13-0051. Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Marcon. 2011. Portrait Québécois du secteur HRI et opportunités de développement pour les produits horticoles frais - Rapport final.
- Mandeel, Q.A., A.A. Al-Laith et S.A. Mohamed. 2005. Cultivation of oyster mushrooms (*Pleurotus* spp.) on various lignocellulosic wastes. *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 21: 601-607.
- Powder Handling. 2016. Bulk density chart. Disponible au: <http://www.powderhandling.com.au/bulk-density-chart>. Consulté le 1^{er} mars 2016.
- Reinold, M. R., 1997. Manual práctico de cervejaria, 1st ed. Aden Editora e Comunicações Ltda, São Paulo. 214 p.
- Stamets, P. 2000. Growing Gourmet and Medicinal Mushrooms. 3rd ed. California, Berkeley : Ten Speed Press.
- Tapco Inc. 2016. Bulk Material Density Table. Disponible au : http://www.tapcoinc.com/content/product_data/tapco_catalog_09_p88-94.pdf. Consulté le 1^{er} mars 2016.
- Thongsook T., et T. Kongbangkerd. 2011. Influence of calcium and silicon supplementation into *Pleurotus ostreatus* on quality of fresh and canned mushrooms. *Food Science and Technology international* 17 (4): 351-365.

Wang, D., A. Sakoda et M. Suzuki. 2001. Biological efficiency and nutritional value of *Pleurotus ostreatus* cultivated on spent beer grain. *Bioresource Technology* 78 (3): 293-300.

Wu, W.J et B.Y. Ahn. 2014. Statistical Optimization of Ultraviolet Irradiate Conditions for Vitamin

D₂ Synthesis in Oyster Mushrooms (*Pleurotus ostreatus*) Using Response Surface Methodology. *PLoS ONE* 9(4): e95359.