

Cécile Tartera

09214131

Rapport de fin d'études

SLS-6014

Thés de compost en agriculture : revue
et essai dans une culture de blé au Québec

Travail présenté à Antoine Karam

Faculté des sciences de l'Agriculture et de l'alimentation
Université Laval

8 décembre 2021

Sommaire

Liste des tableaux et figures	3
Liste des acronymes	4
1. Contexte	5
1.1. Besoin de produits fertilisants et phytosanitaires alternatifs aux engrais et pesticides de synthèse	5
1.2. Principes et potentiel des thés de compost pour l'agriculture	6
2. Définitions et données techniques	7
2.1. Infusions, extraits, thés	7
2.1.1. Définitions	7
2.1.2. Usages	7
2.2. Composition chimique et microbienne et efficacité des thés de compost	8
2.2.1. Facteurs influençant la composition et l'efficacité des thés	8
2.2.2. Variabilité de l'efficacité des thés de compost	12
3. Études portant sur les effets biostimulants des thés de compost	13
3.1. Tomate en serre	13
3.2. Laitue en serre	15
3.3. Autres cultures en serre	18
3.4. Cultures en champ	18
4. Études portant sur les effets biopesticides des thés de compost	19
4.1. Défense contre les agents phytopathogènes	19
4.1.1. Divers pathogènes in vitro	19
4.1.2. Pomme de terre	19
4.1.3. Tomate	21
4.1.4. Autres cultures	24
4.2. Défense contre les ravageurs	24
5. Impacts chimiques et biologiques du thé de compost sur le sol	24
6. Risques sanitaires des thés de compost	25
6.1. Risques de contamination avec des pathogènes humains	25
6.2. Risques de phytotoxicité	26
7. Utilisation sur les fermes, de la théorie à la pratique	27
7.1. Impacts de la recette et de la méthode de production	27
7.2. Défis de fabrication à la ferme	27
7.2.1. Qualité de l'inoculum	27
7.2.2. Équipements pour l'extraction	28
7.2.3. Paramètres d'application	29
8. Suivi d'un essai d'extrait de compost en blé de printemps bio au Québec	29
8.1. Contexte et problématique	29
8.2. Matériel et méthode	30
8.3. Résultats	33
8.4. Analyse	34
9. Conclusion	35
9.1. État des lieux actuel	35
9.2. Perspectives	36
Bibliographie	37

Liste des tableaux et figures

Figure 1. Effet du type de compost et de l'aération sur l'efficacité du thé de compost pour inhiber la croissance mycélienne de <i>P. ultimum</i> (ATC = thé aéré ; NCT = thé non aéré) (source : St-Martin <i>et al.</i> , 2012)	10
Figure 2. Plants de tomates en essais en champ. De gauche à droite : parcelles avec fertilisation minérale et application foliaire hebdomadaire de 0, 100 et 200mg/L d'AH (source : Scotti <i>et al.</i> , 2016)	14
Tableau 1. Synthèse de quelques études sur l'effet d'applications de thé de compost dans la culture de laitues en serre	16
Tableau 2. Synthèse de quelques études sur le potentiel du thé de compost comme biopesticide pour la pomme de terre	20
Tableau 3. Synthèse de quelques études sur le potentiel du thé de compost comme biopesticide pour la tomate	22
Figure 3.a. Effet de l'interaction entre la durée de stockage et le temps d'extraction sur la densité de population bactérienne du thé de compost (source : Islam <i>et al.</i> , 2016)	29
Figure 3.b. Effet de l'interaction entre la durée de stockage et le temps d'extraction sur la densité de population fongique du thé de compost (source : Islam <i>et al.</i> , 2016)	29
Figure 4. Photo de la cuve utilisée pour la préparation du thé de compost	30
Figure 5. Localisation du champ de l'essai (en jaune) et données pédologiques et hydrographiques (source : infosols.ca)	31
Figure 6. Schéma du dispositif de l'essai au champ (TCO = parcelle avec application de thé ; T = parcelle témoin)	32
Tableau 4. Population de blé dans les parcelles, avant application de thé (plants/m ²)	33
Tableau 5. Rendements de blé dans les parcelles avec thé vs sans (tonnes de ms/ha)	34
Tableau 6. Résultats d'analyse de grains réalisés par la meunerie	34

Liste des acronymes

AH	Acides humiques
CRAAQ	Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec
EM	Effective Microorganisms
TCA	Thé de compost aéré

1. Contexte

1.1. Besoin de produits fertilisants et phytosanitaires alternatifs aux engrais et pesticides de synthèse

On sait que :

- la spécialisation des productions agricoles a entraîné une séparation des activités d'élevage et de culture laissant des nombreuses terres sans apports réguliers d'engrais organiques;
- que de nombreux sols voient leur fertilité diminuer du fait d'une diminution du taux de matière organique et d'une faible activité microbienne, et que l'activité microbienne d'un sol impacte ses caractéristiques physiques (notamment stabilité structurale, capacité d'infiltration et de rétention de l'eau) et chimiques (disponibilité des éléments nutritifs organiques et minéraux) (Ingham, 1999b);
- que la surutilisation d'engrais minéraux, associées à des problèmes d'érosion et de lessivage, entraîne la pollution des eaux souterraines et de surface. En ce qui concerne les engrais azotés, ils génèrent d'importantes émissions de gaz à effet de serre lors de la production et des épandages, et de plus en plus de pays adoptent des politiques agricoles visant à réduire leur usage. En ce qui concerne les engrais phosphatés, il s'agit de phosphate de roche d'origine ignée, une ressource non renouvelable et à l'utilisation peu efficace. 87% du phosphore produit dans le monde est utilisé en agriculture et seuls 20% des engrais phosphatés sont prélevés par les plantes, le reste étant rapidement immobilisé dans le sol (Fortin, 2020).

Or l'activité microbienne du sol améliore le recyclage et la disponibilité des éléments nutritifs (Marschner, 1995). La rhizosphère est liée aux fonctions de prélèvement de nutriments et d'eau, de défense contre les ennemis naturels, de résistance aux stress abiotiques et à la qualité nutritionnelle des plantes. Par exemple, les biofilms microbiens peuvent s'associer avec les hyphes des mycorhizes générant une synergie positive augmentant la solubilisation des phosphates (Fortin, 2020).

En outre, un besoin croissant de produits phytosanitaires alternatifs aux pesticides chimiques de synthèse se fait sentir. A titre d'exemple, en 2003 dans l'État de New-York, les producteurs de citrouilles, une culture très sensible au mildiou, étaient déjà aux prises avec des problèmes de résistance aux fongicides à base de strobilurine. Le risque important de contamination de l'aquifère dans les zones de sol sableux particulièrement propice à la lixiviation et l'intérêt du public pour l'auto-cueillette constituaient des motivations supplémentaires pour la recherche d'alternatives aux traitements chimiques dans cette culture (Kelley, 2004).

A la lumière de ces constats, la valorisation de l'activité microbienne que ce soit pour la fourniture d'éléments nutritifs et d'eau ou pour la phytoprotection des cultures apparaît comme une avenue incontournable de l'évolution de l'agriculture. D'ailleurs, de plus en plus de recherche a lieu sur ce sujet. Les compagnies agro-chimiques donnent également une place croissante au développement de produits misant sur l'activité biologique et de plus en plus de biostimulants et de biopesticides sont commercialisés pour une gamme de cultures grandissante. Des compagnies commercialisent des inoculums microbiens pré-mélangés : les EM, pour Effective Microorganisms. Ce cocktail, développé par le Dr. Teru Higa au Japon, comprend une large gamme de bactéries aérobies facultatives, de levures, d'enzymes, de faibles concentrations de minéraux, des vitamines et des acides organiques (Dearborn, 2011). Les thés de composts constituent quant à eux des solutions microbiennes artisanales pouvant être produites directement sur la ferme.

1.2. Principes et potentiel des thé de compost pour l'agriculture

Les fumiers sont couramment utilisés dans l'agriculture partout dans le monde comme engrais organiques. Ils sont considérés essentiellement pour leur valeur fertilisante. De nombreuses études ont permis de caractériser les teneurs en éléments majeurs, mineurs et oligo-éléments de fumiers de divers animaux d'élevage, selon le type de cheptel (race, tranche d'âge et de poids, sexe), la régie d'élevage (nourriture, litière), la gestion des déjections (solide, liquide) et leur traitement éventuel (compostage, déshydratation, biométhanisation). Concernant les éléments majeurs (azote, phosphore, potasse), le guide de référence en fertilisation du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) indique également les coefficients d'efficacité et les facteurs de pertes pour les éléments selon la période d'épandage au champ, le délai d'incorporation au sol ainsi que le type de culture valorisant le fumier (annuelles ou pérennes, nitrophiles ou moins exigeantes en azote) (CCFS, 2010).

Or les engrais organiques, au contraire des engrais minéraux, ne se résument pas à leur contenu fertilisant. Ils contiennent également une importante vie microbienne qui impacte l'activité du sol et donc la physiologie des plantes qui y poussent, *via* la rhizosphère. Ceci s'applique aux fumiers solides, lisiers, purins, biosolides municipaux, digestats de biométhanisation et composts.

Dans les systèmes de production agricole de petite surface et/ou à forte valeur ajoutée, notamment en horticulture maraîchère, fruitière et ornementale, les composts sont largement utilisés. Le compostage se définit comme « un procédé dirigé de bio-oxydation d'un substrat organique hétérogène solide incluant une phase thermophile » (BNQ, 2016). Le compostage n'est évidemment pas nécessaire au recyclage des éléments fertilisants, puisque ceci peut avoir lieu par dépôt de la matière organique directement au sol, comme c'est le cas dans la nature (parfois appelé "compostage de surface" en jardinage). Le processus de compostage présente toutefois plusieurs intérêts pour l'agriculteur ou le jardinier :

- élimination des organismes pathogènes contenus dans les matières organiques initiales;
- élimination du pouvoir germinatif des graines;
- obtention d'un produit au contenu fertilisant stable, pouvant être stocké et utilisé au moment opportun;
- obtention d'un produit uniforme dans un format facile d'utilisation au champ par rapport à la matière organique fraîche;
- localisation des résidus dans un espace restreint dédié, facilitant la gestion des opérations au champ et plus esthétique que le dépôt direct de matière fraîche.

En outre, un bon compost thermique, réalisé à partir de matières organiques diversifiées et respectant les opérations permettant de préserver des conditions aérobies, contient une activité microbienne importante et diversifiée, à même de bénéficier au sol et aux cultures. Malheureusement, il est rare que le processus de compostage (aération, temps et températures adéquats) soit respecté et que ces bénéfices puissent se concrétiser. Ainsi le terme "compost" est utilisé largement de manière inadéquate pour parler de matières organiques disposées en amas pendant quelques semaines à quelques années, sans rien révéler de la composition initiale, des paramètres du processus de décomposition ni de la maturité du produit. Dans le meilleur des cas, l'agronome aura accès à la teneur en éléments majeurs organiques et minéraux mais l'activité microbienne est inconnue.

Compte-tenu de ce qui précède, il apparaît aujourd'hui très pertinent de valoriser les composts non pas seulement pour leur valeur nutritive mais aussi pour leur activité microbienne bénéfique. C'est le principe du thé de compost, qui est un extrait liquide de compost dans l'eau dans lequel se retrouvent

les nutriments solubles du compost, organiques et minéraux, une grande partie des microorganismes - bactéries, champignons, protozoaires et nématodes - des enzymes et des acides humiques (Edwards *et al.*, 2007 ; Ingham, 1999a). Alors que le traitement de l'ensemble des terres en culture nécessiterait le recours à des quantités phénoménales de compost, les thés présentent les grands avantages de concentrer les populations d'organismes bénéfiques dans de petits volumes et de pouvoir être appliqués dans l'eau d'irrigation ou par pulvérisation. Ainsi une petite quantité de compost est nécessaire (20 livres de compost pour 100 gallons US de thé) et le produit peut être facilement appliqué sur de vastes surfaces (Ingham, 1999a). Lors du congrès de IFOAM organics International à l'Université de Californie en 1986, Weltzien, un pionnier dans la recherche sur les thés de compost, avait présenté certains travaux de l'Université Friedrich Wilhelm de Bonn en Allemagne. Brinton *et al.* (2004) relient les fréquentes visites subséquentes de Weltzien aux États-Unis aux débuts de la recherche sur le thé de compost dans le pays. Riggle (1996) mentionne plusieurs études réalisées dans les années 1990 par l'Université de Pennsylvanie, le Cabrillo College en Californie et l'Université de l'Oregon, et l'appui financier de l'Organic Farm Research Foundation. Quoique la recherche sur les thés de compost ait commencé au milieu des années 1980, le sujet suscite un intérêt croissant depuis le début des années 2000. Des essais *in vitro*, en serre et en champs et des témoignages de producteurs attestent que ces substances ont le potentiel de contrôler efficacement des maladies des plantes, notamment les infections fongiques (Kelley, 2004 ; Durham, 2006 ; Riggle, 1996).

2. Définitions et données techniques

2.1. Infusions, extraits, thés

2.1.1. Définitions

Le thé est un extrait aqueux concentré de microorganismes bénéfiques, issus d'un compost dont le processus de fabrication a été soigneusement piloté. Selon les sources, le terme "thé de compost" désigne plusieurs types de préparation aux caractéristiques distinctes, ce qui rend difficile la comparaison des résultats et l'évaluation des témoignages. Lanthier et Peters (2013) définissent les thés de compost comme des produits résultant du mélange de compost et d'eau. "Le mélange peut être laissé avec une perturbation minimale, on parle d'extrait de compost ou de macérations, ou activement fourni en oxygène par une pompe pour stimuler la croissance des microorganismes aérobies". La cinquième édition de "The Compost Tea Brewing Manual" (Ingham, 2005) distingue thé de compost aéré ou non, extrait et infusion et propose les définitions suivantes :

- Thé de compost aéré (TCA) ("aerated compost tea")

"Un extrait aqueux de compost, brassé sans utilisation de chaleur, qui permet aux organismes bénéfiques de se multiplier de manière importante. Il peut y avoir ou non ajout de nourriture. Si aucune nourriture n'est ajoutée, les organismes ne sont pas très actifs et donc moins susceptibles de survivre à un transfert sur le sol ou sur la surface des plantes."

- Thé de compost non aéré ("non-aerated compost tea")

"Un extrait aqueux, brassé, avec ou sans nourriture ajoutée, mais sans oxygénation."

- Extrait de compost ("compost extract")

"En faisant passer de l'eau à une pression significative à travers le compost, les organismes et les nutriments solubles peuvent être extraits des formes solides, selon la force d'extraction appliquée"

- Infusion de compost ("compost leachate")

“Un mouvement d’eau passif à travers un bon compost emporte des nutriments solubles et quelques organismes. Une infusion n’est pas forcément anaérobie mais peut l’être si les organismes dans le compost se multiplient rapidement. Des composés phytotoxiques peuvent être présents et des nutriments peuvent être perdus si l’infusion devient anaérobie”

Toutefois, au cours des dernières années, dans ses cours, Ingham utilise plutôt la terminologie suivante:

- Thé de compost : brassage avec apport d’air et d’additifs nutritifs
- Extrait de compost : brassage avec apport d’air mais pas d’additifs nutritifs
- Infusion : mouvement passif, pas de brassage, pas d’additifs nutritifs

Nowers (2008) fait la même distinction entre thé et extrait.

Les méthodes traditionnelles de préparation utilisées par les agriculteurs européens et étudiés par Weltzien et Tränker en Allemagne n'impliquent pas d'aération lors de l'extraction. C'est suite à la préoccupation croissante pour la salubrité alimentaire en production biologique au début des années 2000 aux États-Unis que des études ont été mandatées pour évaluer les risques de contamination humaine liés aux thés de compost et que les méthodes modernes de production aérobie ont été mises de l'avant. Les méthodes traditionnelles de compostage et de préparations aqueuses à partir de compost ont alors été qualifiées d'anaérobies. L'opposition des “bons” composts et thés aérobies et des “mauvais” composts et thés anaérobies a causé une controverse parmi les utilisateurs et les chercheurs qui a mené à la multiplication d'études sur l'impact de ces deux modes de préparation sur l'efficacité agronomique et sur l'innocuité des produits en résultant (Brinton *et al.*, 2004). L'étude de Brinton *et al.* (2004) montre que, contrairement aux attentes, le nombre de bactéries aérobies n'augmente pas forcément moins vite dans les thés préparés selon la méthode passive qu'avec des extracteurs mécaniques avec aération. Les facteurs expliquant les dynamiques de croissance des populations microbiennes dans les thés ne sont pas encore bien compris à ce jour.

Le brassage présente deux intérêts : le mélange et l'aération de la préparation (Ingham, 1999b). Le TCA a l'avantage d'être plus rapide à produire (un à trois jours vs environ deux semaines pour un thé de compost non oxygéné), de réduire le risque de développement de pathogènes humains (Brinton *et al.*, 2004 ; Durham, 2006 ; Kelley, 2004) et d'obtenir des organismes plus actifs, surtout avec l'utilisation de suppléments nutritifs (Ingham, 2005).

Par la suite, le terme générique “thé de compost” sera utilisé pour parler des diverses solutions liquides résultant d’une extraction de compost dans de l’eau. Un terme plus spécifique sera utilisé pour référer à une technique en particulier le cas échéant.

2.1.2. Usages

- Comme biostimulant

La préparation de thés par suspension d’un sac de compost dans un baril d’eau pendant une durée allant jusqu’à deux semaines, pour extraire les nutriments visant promouvoir la vitalité et la santé des plantes est une pratique traditionnelle centenaire (Dearborn, 2011). “Le compost est une source de biostimulants naturels, tels que les acides humiques et les composés organiques générés lors de la décomposition et la transformation des résidus organiques” (Scotti *et al.*, 2016). Le thé de compost permet de corriger des carences nutritives plus rapidement que le compost car les nutriments sous forme dissoute sont rapidement assimilés par les feuilles et les racines, et l’apport de nutriments s’accompagne d’un apport

d'acides humiques, d'enzymes et d'hormones de croissance (Edwards *et al.*, 2007 ; Kasim *et al.*, 2021). Cet aspect sera développé dans la partie 3.

En revanche, les thés n'apportent pas la matière organique permettant de contribuer à la formation d'humus. Pour fournir des bénéfices à long terme, il convient de garantir l'apport de sources de nourriture aux organismes du sol afin de soutenir leur croissance et leur multiplication. Une valorisation optimale des thés va donc de pair avec des apports diversifiés de matière organiques, que ce soit par des résidus de cultures, du bois raméal fragmenté, des pailles, des composts matures, etc.

- Comme biopesticide

Le contrôle de maladies grâce au thé de compost a été observé pour une diversité de cultures (voir partie 4). “La stérilisation des composts et des thés de compost résulte généralement en une perte de contrôle des maladies. Ceci indique que les mécanismes de suppression sont souvent, ou essentiellement, biologiques, quoique des facteurs chimiques et physiques sont aussi impliqués” (St-Martin et Brathwaite, 2012). Plusieurs modes d'action entrent en jeu dans l'effet biopesticide des thés de compost (Dearborn, 2011 ; Kelley, 2004 ; Nowers, 2008 ; St-Martin *et al.*, 2012) : compétition pour la colonisation des sites et les nutriments ; antagonisme : sécrétion d'antibiotiques ou de substances antifongiques, inhibition de la germination des spores fongiques (Li *et al.*, 2020 ; Naidu *et al.*, 2012 ; On *et al.*, 2015 ; Palmer *et al.*, 2010 ; Pane *et al.*, 2012); parasitisme ; résistance induite chez la plante (Ibrahim et El-Fiki, 2019 ; Li *et al.*, 2020 ; Samet *et al.*, 2018 ; Segarra *et al.*, 2006).

Alors que selon Ingham et Alms (2003) l'efficacité du thé est liée à la population microbienne totale, St-Martin *et al.* (2012) indiquent que l'effet inhibiteur de la croissance du pathogène *Pythium ultimum* résulte de l'action conjuguée de plusieurs groupes microbiens spécifiques. De même, Brinton *et al.* (2004) mentionnent de récentes études qui “montrent que le contrôle des maladies était élevé seulement au début de la période de forte activité microbienne et que les espèces de bactéries changent, suggérant fortement qu'un groupe de bactéries spécifiques responsables du contrôle est remplacé par d'autres dans la succession. Ceci signifierait que “beaucoup de bactéries” n'est pas suffisant pour maintenir un contrôle des maladies dans le temps.”

Le contrôle des pathogènes obtenu avec les thés aérés ou non est influencé par “les matières organiques initialement apportées au compost, l'âge du compost, l'humidité, le temps de fermentation, l'ajout de nutriments, la température et le pH” (Riggle, 1996). L'influence de ces paramètres est confirmée par plusieurs études (Palmer *et al.*, 2010 ; Pant *et al.*, 2012 ; Scheuerell et Mahaffee, 2006 ; St-Martin *et al.*, 2012). Un essai comparant du thé de compost extrait dans de l'eau et dans du lactosérum de mozzarella révèle aussi l'influence du liquide d'extraction (Pane *et al.* 2012).

2.2. Composition chimique et microbienne et efficacité des thés de compost

2.2.1. Facteurs influençant la composition et l'efficacité des thés

Dans une revue réalisée en 2011, Dearborn identifie les facteurs de variation suivant : type de compost, ratio compost/eau, temps de brassage, suppléments nutritifs, additifs microbiens, aération, filtration et dilution avant application.

- Type et qualité de l'inoculum

De nombreuses études démontrent l'impact du type de compost sur les caractéristiques chimiques et microbiennes des thés de compost (Dearborn, 2011 ; Pant *et al.*, 2012 ; St-Martin *et al.*, 2012).

Selon Ingham (1999b), un compost pauvre et peu diversifié en activité microbienne donnera un thé peu intéressant. Les résultats de St-Martin *et al.*, (2012) contredisent toutefois cette affirmation puisque du thé de compost de feuilles de bananes non aéré a procuré un meilleur contrôle du pathogène *P. ultimum* que du TCA du même compost (figure 1). Les auteurs suggèrent que la présence et l'abondance de groupes spécifiques de microorganismes à l'activité connue sont des indices plus fiables de l'efficacité potentielle du thé que la richesse et la diversité de la communauté microbienne totale, et ce qu'il s'agisse d'un thé aéré ou non.

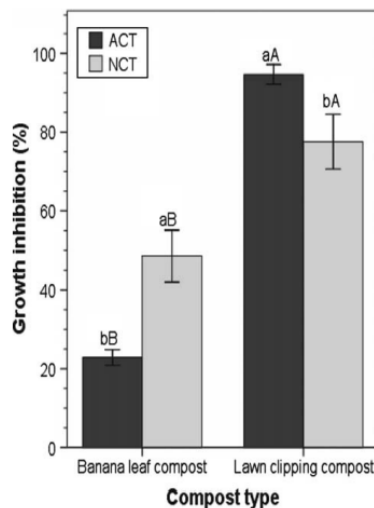


Figure 1. Effet du type de compost et de l'aération sur l'efficacité du thé de compost pour inhiber la croissance mycélienne de *P. ultimum* (ATC = thé aéré ; NCT = thé non aéré) (source : St-Martin *et al.*, 2012)

Un compost au contenu microbien intéressant est nécessaire mais pas suffisant pour produire un thé efficace puisque l'activité microbienne peut se détériorer au cours du processus d'extraction ou au moment de l'application (Ingham, 1999a). Bien que réalisé à partir d'un inoculum de qualité, le thé ne procurera pas alors les bénéfices attendus, de biostimulant, de phytoprotection ou autre (voir partie 7).

- Processus d'extraction : aération, additifs, temps de brassage, température

Au cours du brassage, "les microorganismes convertissent des nutriments insolubles en nutriments disponibles. Ceux-ci à leur tour promeuvent la croissance d'une communauté diversifiée d'organismes dans le thé" (Dearborn, 2011).

Il n'existe pas dans la littérature de degré d'oxygénation standard pour distinguer un thé oxygéné d'un thé non aéré. Les concentrations d'oxygène dissous mesurées par St-Martin *et al.* (2012) dans les TCA sont toutefois plus favorables à la prolifération de microorganismes aérobies que celles mesurées dans les thés non aérés. La concentration en oxygène dissous et les compositions chimique et microbienne du thé varient de manière dynamique au cours du processus de brassage. Par exemple, l'ammonium et l'oxygène sont utilisés par les microbes pour la synthèse d'acides, d'enzymes et d'autres molécules ainsi que pour leur croissance et multiplication. Cette consommation est moins rapide dans les thés non aérés que dans les TCA. St-Martin *et al.* (2012) constatent en outre qu'au final les thés non aérés sont plus

riches en ammonium, nitrites et nitrates. Ceci s'explique du fait que, dans les TCA, l'activité microbienne plus importante augmente la nitrification de l'ammonium, générant des pertes d'azote par volatilisation et par dénitrification.

Ingham (2005) affirme que "les organismes sont sélectionnés par la température, les sources de nourriture présentes, la teneur en nutriments, la teneur en oxygène au cours du processus de brassage. Quand l'oxygène tombe sous un certain seuil, des nutriments peuvent être perdus et des organismes pathogènes peuvent se développer. L'oxygène est critique mais la diversité d'organismes aérobies aussi. Le panel d'organismes compétiteurs doit être présent pour prévenir la croissance de pathogènes. La quantité de nourriture ajoutée doit être limitée : assez pour atteindre la croissance maximale des organismes souhaités, mais pas trop éviter que la teneur en oxygène ne tombe sous un seuil anaérobie. L'équilibre est essentiel : maximiser la croissance mais maintenir des conditions aérobies."

On pourrait s'attendre à ce que les thés non brassés favorisent un environnement anaérobie. Or les résultats de Brinton *et al.* (2004) montrent que les thés réalisés sans aération mécanique ne présentent pas d'importantes quantités de bactéries anaérobies. En outre, selon les auteurs, l'aération excessive n'est pas souhaitable puisque, vue la faible solubilité de l'air dans l'eau, seule une certaine proportion est effectivement dissoute dans l'eau tandis que le reste est perdu.

Lanthier et Peters (2013) ont réalisé une série de 25 TCA en faisant varier les ingrédients ou les procédures et ont réalisé des comptages et identifié les microorganismes dans les thés obtenus. La recette de base consistait en 15L d'eau (pH 7), 485g de compost de déchets verts, 285g de vermicompost commercial, 30ml d'acides humiques, 30ml de jus d'algues commercial *Ascophyllum nodosum* et 30ml d'hydrolysate de poisson. La procédure de base consistait en 60 minutes d'aération de l'eau dans une cuve de brassage commerciale, les ingrédients étaient ensuite ajoutés puis retirés 5h après, et le brassage était poursuivi pendant encore 17h à température pièce de 20°C. Les résultats sont les suivants :

- un temps de brassage plus long augmente l'activité des protozoaires;
- l'ajout d'acides humiques stimule l'activité fongique;
- l'ajout d'algues stimule l'activité des protozoaires;
- l'ajout d'hydrolysate de poisson stimule l'activité fongique et augmente la teneur en nutriments;
- l'utilisation de vermicompost résulte en une plus grande quantité de champignons;
- l'ajout de sources de nourriture protéinées dans le compost avant le brassage résulte en une plus grande activité des protozoaires.

Les auteurs soulignent toutefois la difficulté de répéter les expériences puisque le contenu microbien change en permanence et rend difficile de mesurer un grand nombre d'échantillons sur une courte période.

St-Martin *et al.* (2012) observent que la concentration en plusieurs nutriments augmente avec le temps de brassage, en lien avec un effet de concentration lié à l'évaporation d'eau au cours du brassage. L'évaporation est plus importante dans les TCA avec injection mécanique d'air par une pompe que dans les thés non aérés. Le pH reste stable au cours du brassage. Les populations maximales de bactéries, levures et champignons sont atteintes en moins de 3 jours dans les TCA vs jusqu'à une semaine dans les thés non aérés (St-Martin *et al.*, 2012). Brinton *et al.* (2004) comparent aussi l'approche européenne, "selon laquelle du compost de fumier est suspendu dans un baril d'eau avec agitation douce sur plusieurs jours", à l'approche moderne impliquant des extracteurs mécaniques aérés. Quel que soit le mode de préparation, les thés contiennent plus de bactéries aérobies après 72h qu'après 24h. Les auteurs citent plusieurs travaux qui montrent également une meilleure efficacité phytosanitaire avec l'augmentation de la durée d'extraction. Islam *et al.* (2016) pour leur part observent une diminution de l'azote total, du carbone et de la matière organique et des populations bactériennes et fongiques au bout de 4 et 6 jours

d'extraction. La composition optimale en nutriments et en microorganismes est obtenue après 2 jours d'extraction. Ces résultats rejoignent les observations de Ingham et Alms (1999, cités dans Islam *et al.*, 2016) qui rapportent une activité microbienne maximale entre 18 et 36h d'extraction. St-Martin *et al.* (2012) observent quant à eux que le temps d'extraction n'a pas d'effet sur l'efficacité du contrôle de *P. ultimum* au-delà de 18h pour le TCA et de 56h pour le thé non aéré.

- Application

De nombreuses études montrent l'influence de la dilution, de la dose, de la période (pré ou post-infection par le pathogène), de la fréquence et du mode d'application (pulvérisation foliaire vs trempage racinaire ou fertigation) sur l'effet des traitements avec thé de compost sur la croissance des plantes et sur le développement d'agents pathogènes et de symptômes de maladies (Kim *et al.*, 2015 ; Scheuerell et Mahaffee, 2004 ; Seddigh et Kiani, 2017).

L'action biopesticide foliaire du thé requiert que les organismes soient actifs et capables de coller sur les feuilles, aussi plusieurs chercheurs et utilisateurs tendent à privilégier pour cet usage un TCA, supposé présenter une activité microbienne plus importante. Toutefois, l'étude de Scheuerell et Mahaffee (2006) ne montre aucune corrélation entre la population microbienne dans un TCA et le contrôle du pathogène *Phytophthora* sur le concombre. En revanche, quand des nutriments sont ajoutés au cours du brassage, une efficacité plus régulière est obtenue. Ces résultats suggèrent que les additifs nutritionnels supportent l'activité microbienne plus que l'aération.

Dearborn 2011 rapporte qu'afin d'améliorer la couverture foliaire et la durée de vie du biofilm, Brinton et Droffner (1995, cités dans Dearborn, 2011) proposent d'ajouter au thé un surfactant non-ionique avant l'application sur les plantes. Scheueller et Mahaffee (2006) ont testé plusieurs adjuvants permettant d'augmenter l'efficacité d'un TCA pour le contrôle de *Botrytis cinerea*. Dearborn (2011) mentionne qu'il existe de nombreux surfactants naturels tels que l'huile de coco, l'huile de palme, la lanoline, des acides aminés etc. Toutefois, il y a peu de recherches sur l'efficacité de ces produits en termes d'amélioration de l'effet biopesticide du thé.

Kasim *et al.*, 2021 soulignent que "l'utilisation de fortes concentrations [de fertilisants organiques] inhibe la croissance et le développement de semences alors que d'un autre côté, des concentrations trop faibles ne supportent pas la production et le développement optimal de semences de cacao". Ainsi il est nécessaire de déterminer la bonne concentration selon les plantes.

2.2.2. Variabilité de l'efficacité des thés de compost

Ingham disait en 1999 (a) : "On ne sait pas exactement ce qui fait un bon thé de compost de manière récurrente. [...] Les bénéfices sont reliés aux organismes dans le thé. Mais quels organismes? Le même panel partout? Bien sûr que non. Probablement un panel différent des "meilleurs" organismes pour chaque plante, chaque cultivar, chaque climat et chaque saison. [...] On ne connaît pas les noms de toutes les espèces d'organismes dans le thé, on sait encore moins comment les cultiver en laboratoire. Donc pour le moment on vise le maximum de diversité". Tout en reconnaissant l'intérêt de tester d'abord en conditions contrôlées le potentiel de divers organismes par rapport à des agents pathogènes précis, Ingham (1999a) estime alors prétentieux de tenter de "comprendre la complexité des interactions des contrôles biologiques de tous leurs organismes (des agents de biocontrôle industriels) avec tous les autres organismes et conditions présents dans le champ" et donc de prédire leur efficacité. En 1996, Riggall affirme que "le nombre de variables microbiologiques qui doivent être considérées dans la

recherche sur les thés de compost rend les généralisations difficiles et les affirmations universelles presque impossibles”.

Depuis, la recherche a progressé et de plus en plus d'organismes et leurs modes d'action ont pu être identifiés, et même produits de manière industrielle et conditionnés pour être commercialisés aux agriculteurs. Les biostimulants et biopesticides sont caractérisés et standardisés : leur composition est stable et connue, ils agissent dans un objectif précis avec un taux d'efficacité évalué. Ils offrent ainsi une facilité d'utilisation pour les usagers qui se rapproche de celle des produits fertilisants et phytosanitaires chimiques. En revanche, une grande difficulté des biopesticides est de garantir la survie et la croissance des organismes dans les conditions environnementales au champ (Mazzola et Freilich, 2016 ; Walker *et al.*, 2002).

Les thés, de par leur production artisanale, ont une composition et une efficacité plus variables. La recherche, les essais au champ documentés et les expériences d'agriculteurs ont permis d'attester dès la fin des années 1980 du potentiel de ces substances pour le contrôle des maladies des plantes et pour leurs effets biostimulant (Brinton *et al.* 2004 ; Riggle, 1996). Toutefois, Islam *et al.* (2016) déplorent le manque de procédé d'extraction standardisé, qui explique selon eux les résultats variables et souvent contradictoires des expérimentations sur les thés de compost. En outre, jusque dans les années 2000, la recherche concernait essentiellement les thés traditionnels non oxygénés (Kelley, 2004). En 2000, est parue la première édition de “*The Compost Tea Brewing Manual*” de Ingham. En 2005, le guide en était à sa cinquième édition (Ingham, 2005). De plus en plus de recherche a lieu sur ce sujet, permettant de caractériser la microbiologie et les modes d'action de ces produits et de comprendre de mieux en mieux les paramètres influençant le panel de microorganismes, leur survie et leurs interactions avec les organismes de la rhizosphère ou de la phyllosphère, leur efficacité biopesticide ou biostimulante. D'ailleurs, le catalogue de la bibliothèque de l'Université Laval recense 1127 résultats contenant le terme “compost tea” sur les vingt dernières années (2001 à 2021) dont 416, soit 37%, sur les cinq dernières années.

En résumé, les sources de variabilité des résultats des études portant sur l'efficacité agronomique des thés de compost sont :

- le manque d'études fiables;
- le peu d'études sur les TCA vs les thés non aérés;
- l'absence de protocole standard de fabrication des thés, alors même que de nombreux facteurs influencent la composition chimique et microbienne des thés (voir partie 2.2.1.);
- pas de méthode standard d'évaluation de la composition et de l'activité microbienne;
- protocoles d'application très variables : mode d'application, dilution, fréquence, stade, milieu de croissance, etc.;
- interaction des communautés microbiennes des thés avec les phytopathogènes de l'environnement au champ.

3. Études portant sur les effets biostimulants des thés de compost

3.1. Tomate en serre

La tomate est une des cultures sur lesquelles le plus d'études ont été conduites.

Scotti *et al.* (2016) ont réalisé une extraction d'acides humiques (AH) et un TCA à partir de compost thermique de déchets verts. Les plants de tomates traités étaient cultivés sur un substrat de perlite avec un engrais minéral liquide du commerce.

En milieu contrôlé, à certaines concentrations, l'application foliaire d'AH a augmenté le nombre de feuilles, ce que les auteurs attribuent possiblement à une action des AH "semblable à une hormone via leur influence sur la respiration cellulaire, la photosynthèse, la phosphorylation oxydative, la synthèse de protéines et diverses réactions enzymatiques"

Le traitement racinaire avec le TCA dilué à 1:10 a amélioré la germination tandis que dilué à 1:1, il a entraîné une phytotoxicité. Les hypothèses recueillies par les auteurs dans la littérature pour expliquer ces effets sont que les AH et le TCA affectent la respiration et la photosynthèse et stimulent le métabolisme des acides nucléiques et l'activité hormonale.

Le traitement racinaire avec des AH a généré la production de racines secondaires, un effet déjà observé dans de précédents essais. Les auteurs expliquent que cette "élongation des racines secondaires est générée par un mécanisme décrit comme la "acid growth hypothesis", qui consiste en l'induction de la synthèse de protéines et l'activation de la H⁺-ATPase de la membrane plasmique", qui sont normalement induite par l'auxine.

Les acides humiques ont aussi été testés au champ avec des traitements foliaires hebdomadaires. Les traitements n'ont pas augmenté la production de tomates mais ont eu un effet sur la santé et la croissance végétative des plantes (figure 2). "De nombreuses études ont en effet montré l'effet inhibiteur significatif des AH sur les champignons phytopathogènes" (Loffredo et Senesi, 2009).



Figure 2. Plants de tomates en essais en champ. De gauche à droite : parcelles avec fertilisation minérale et application foliaire hebdomadaire de 0, 100 et 200mg/L d'AH (source : Scotti *et al.*, 2016)

Ochoa-Martinez *et al.* (2009) ont comparé l'effet sur le rendement et l'indice Brix de l'application de solution nutritive, de thé de compost dilué et de compost. Le meilleur rendement a été obtenu avec la solution nutritive, le thé de compost ayant donné un rendement 17% moins élevé, un poids de fruits 21% moindre et une augmentation de 19% des solides dissous. Toutefois la concentration d'azote foliaire début floraison et avant récolte était similaire avec les deux traitements et aucun symptôme de carence n'a été observé. Les auteurs en concluent que "le thé de compost réduit les besoins en azote et autres nutriments des plantes, réussissant à produire plus de 18kg/m² de fruits avec plus de 4 degrés Brix de solides dissous à un coût de fertilisation moindre".

L'étude de Hakim *et al.* (2020) évalue l'effet de l'utilisation d'un thé de compost non aéré dans le cadre d'un usage d'eau réduit pour augmenter la durabilité de la production de tomates. L'irrigation par assèchement partiel et alterné des racines ("partial root zone drying irrigation") est une technique d'irrigation permettant d'économiser jusqu'à 50% d'eau dans la culture de tomates. En ce qui concerne les plants cultivés avec irrigation partielle, l'étude montre un effet significatif du thé sur la taille, le poids et la fermeté des tomates, le nombre de grappes par plant, le nombre de tomates par grappes et le contenu en lycopène. En ce qui concerne les plants cultivés avec irrigation au goutte à goutte, le thé a eu un effet positif sur la taille des plantes, la surface foliaire, le contenu en chlorophylle et en eau des

fruits. Mais il y avait des symptômes de pourriture apicale, les tomates avaient un poids inférieur et d'autres effets négatifs. L'étude montre ainsi que le thé augmente plus significativement le rendement et la qualité des tomates avec l'irrigation partielle que conventionnelle.

Depuis 2003, plusieurs études ont été menées à l'Ohio State Laboratory sur les modes de préparation et d'utilisation ainsi que les doses d'application et les méthodes optimales de stockage de thé de vermicompost. Arancon *et al.* (2007) ont observé un impact positif d'application au sol de thé de vermicompost sur le taux de germination, la taille et la croissance de plantules de tomates et de concombres en serre. Les résultats étaient supérieurs avec du thé aéré vs non aéré.

La pulvérisation hebdomadaire de thé aéré de compost de résidus de légumes et de copeaux de bois sur des plantules de tomates, de poivrons et de melons en serre ont eu un impact positif sur la croissance racinaire, le diamètre de la tige, le nombre de feuilles et la biomasse fraîche de plantules (Villecco *et al.*, 2020).

En complément de l'incorporation de compost de déchets organiques municipaux au substrat de culture de tomates en pot, des pulvérisations foliaires répétées de thé non aéré de compost de déchets organiques municipaux sur des plants tout au long de la croissance ont mené à une augmentation du rendement, du nombre de fruits et de la concentration en potassium dans les tissus foliaires (Radin et Warman, 2011). La solubilité importante du potassium fait en sorte que le thé de compost est un engrais liquide efficace en ce qui concerne ce facteur de rendement limitant dans la culture de tomate.

3.2. Laitue en serre

La culture de laitue en serre a également fait l'objet de nombreux essais scientifiques. Les résultats de quelques-uns sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 1. Synthèse de quelques études sur l'effet d'applications de thé de compost dans la culture de laitues en serre

référence	substrat de culture	type de thé	type de compost	doses de thé et volumes d'eau	durée et fréquence d'application	modes d'application	résultats
Eudoxie <i>et al.</i> , 2017	perlite et vermicompost commercial	TCA	compost thermique de fumier et TCA de vermicompost	dilution à 20% dans 100ml/plante/jour	4 semaines	foliaire ou au pied des plants	Rendement supérieur avec traitement de thé de compost thermique au sol, du fait de l'augmentation de la biomasse aérienne. C'est le mode d'application recommandé par les auteurs pour la laitue. Composition des tissus non affectée à part pour le Mg, qui était plus élevé avec traitement de thé de vermicompost en application foliaire. Fourniture insuffisante de N pour la croissance de la culture avec les thés de compost mais analyse de tissu correcte pour P et K.
Eudoxie <i>et al.</i> , 2019	terreau commercial	TCA	compost thermique de fumier et de paille de maïs	dilution à 0, 5, 10, 20% dans 100ml ou 200ml/plante/jour	30 jours	au pied des plants	Augmentation du rendement avec application d'une concentration croissante de 0 à 10% de thé dans 200cm ³ /plante/jour. L'application de thé à 5% a augmenté le volume et la profondeur des racines, expliquant une partie de la variation de rendement. Diminution de rendement avec application d'une concentration de 20% de thé.
Kim <i>et al.</i> , 2015	tourbe et fibre de coco	TCA	composts d'herbes médicinales orientales, de vermicompost, de compost de paille de riz et mélange des trois	concentration croissante de 0 à 0,8%. dans 50ml/plante/jour	4 semaines	foliaire et au pied des plants	Plus grande augmentation de biomasse aérienne de laitue obtenue avec application de TCA du mélange de composts à 0,8%.

Pane <i>et al.</i> , 2014	sol loameux	TCO	compost d'artichauts et de fenouils	dilution à 10%	chaque semaine de la transplantation à la récolte	foliaire ou au pied des plants	Augmentation de rendement de laitue de 24% et augmentation de la chlorophylle foliaire.
---------------------------	-------------	-----	-------------------------------------	----------------	---	--------------------------------	---

3.3. Autres cultures en serre

Des pulvérisations foliaires de TCA ont donné des augmentations de rendements dans des cultures en serre de poivrons (*Capsicum annuum* L.) (Zaccardelli *et al.*, 2018 ; Abd-Alrahman et Sayed Aboud, 2021) et de pak choï (*Brassica rapa* cv Bonsai) (Pant *et al.*, 2012).

Une expérience réalisée par Edenborn *et al.* (2018) “suggère que le biochar inoculé avec des microorganismes issus du thé de vermicompost peut améliorer la croissance de l’aubergine en association avec les caractéristiques physiques et chimiques de certains sols.”

Kim *et al.* (2015) ont testé des concentrations croissantes de thé aéré de composts d’herbes médicinales orientales, de vermicompost, de compost de paille de riz et du mélange des trois sur des plants de soya (*Glycine max*) cultivés en serre sur un substrat de tourbe et de fibre de coco TCO. L’application de TCA du mélange de composts à 0,8% a augmenté la croissance foliaire et racinaire du soya et du maïs sucré. A 0,8% de concentration le soya avait 7,25 fois plus de nodules qu’à 0,1%. Ces résultats confirment l’effet de la dilution sur la réponse de la culture aux traitements avec du thé de compost.

3.4. Cultures en champ

Dans un essai en plein champ, Solihah *et al.*, (2017) ont aussi obtenu une augmentation du rendement de soya avec une application de différentes doses de thé de compost enrichi en *Trichoderma spp.* En revanche, Bali *et al.* (2021) n’ont constaté aucun impact sur les communautés bactériennes du sol ni sur le rendement de soya suite à quatre pulvérisations foliaires de TCA issu d’un mélange de vermicompost et de compost thermal.

Dans une culture en champ de betterave à sucre (*Beta vulgaris* L.), l’application foliaire de thé de compost a généré une augmentation du rendement et des paramètres de qualité du sucre (El-Gizawy *et al.*, 2014). Les auteurs pensent que cet effet favorable peut être attribué à la présence dans le thé de microorganismes favorables et de micronutriments solubles mais aussi à l’amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. “Le thé de compost combiné avec l’application d’engrais azotés minéraux était la meilleure régie pour augmenter le rendement, la concentration en potassium, la qualité et le pourcentage de sucre de la culture, et réduire les coûts des fertilisants.”

D’autres études soutiennent l’intérêt agronomique et économique d’apports combinés d’engrais et de thé de compost. Naidu *et al.* (2013) ont constaté une augmentation du poids, de la taille, de la concentration en matière sèche soluble (°Brix) et de la fermeté des fruits dans une culture de melon (*Cucumis melo* L.) après application de fertigation réduite en combinaison avec du TCA. Les auteurs concluent qu’“une dose réduite de nutriments dans les systèmes de fertigation en combinaison avec une pulvérisation foliaire hebdomadaire de thé de compost enrichi en microorganismes pourrait être utilisée comme biofertilisant et biopesticide sur le melon sans compromettre la qualité des fruits”.

Hargreaves et Warman (2009) ont testé l’effet fertilisant de différentes doses de compost de résidus organiques municipaux et de TCA réalisé à partir de ce compost sur des cultures de fraises. Le thé a été appliqué par pulvérisation foliaire hebdomadaire pendant 12 semaines. A l’issue de l’étude, les différentes modalités n’ont pas engendré de différences au niveau de la qualité des fruits (antioxydants et vitamine C) et aucun traitement n’a fourni un apport suffisant d’azote pour les besoins de culture, aussi le rendement était inférieur au témoin. Notons que la combinaison d’apport de compost et de thé n’a pas été testée. Hirzel *et al.* (2012) quant à eux évaluent l’impact de différentes régies d’application d’engrais minéraux, de composts commerciaux de résidus de plantes et de fumier de porc biostabilisé,

de TCA et de combinaisons de composts et de thé dans une culture de ray-grass (*Lolium perenne* L.). Quatre fauches ont été réalisées. Les auteurs mettent en évidence qu'il y a un effet positif du thé de compost si des sources de carbone relativement solubles sont apportées au préalable (ici deux types de composts commerciaux). En revanche, l'utilisation de thé de compost sur un sol non amendé n'a pas eu d'effet sur la matière sèche produite ni sur l'efficacité de prélèvement d'azote.

Des applications foliaires hebdomadaires de thé aéré de compost d'oignons et de résidus de vignes dans une culture de bébé épinards (*Spinacia oleracea*) ont produit une augmentation de rendement. L'application de thé inoculé avec *Trichoderma harzianum* T78 a en outre entraîné une augmentation de la qualité des plantes (phénols, antioxydants et flavonoïdes) (Ros *et al.*, 2020).

Kasim *et al.*, 2021 ont testé différentes doses de thé de compost sur des plantules de cacao (*Theobroma cacao* L.). Le thé a été réalisé à partir de compost de fumier de poulet inoculé avec le produit biodécomposeur Promi. Ce produit contient un mélange de microorganismes favorisant la croissance des plantes, la solubilisation des nutriments du sol et le contrôle d'agents phytopathogènes (entre autres *Trichoderma harzianum* DT 38, *T. pseudokoningi* DT 39 et *Aspergillus sp.*). Le traitement a eu un effet positif variable sur la hauteur des plantules, le nombre de feuilles, le diamètre de la tige, la biomasse racinaire et les indices chlorophylliens selon les clones et la dilution.

4. Études portant sur les effets biopesticides des thés de compost

4.1. Défense contre les agents phytopathogènes

4.1.1. Divers pathogènes in vitro

Des tests in vitro ont montré l'effet inhibiteur de thés de compost sur la croissance d'une diversité d'agents phytopathogènes : *Alternaria solani*, *Bipolaris sorokiniana*, *Fusarium oxysporum*, *Pestalotia palmarum*, *Sclerotium rolfsii* (Islam *et al.*, 2019), *Rhizoctonia solani*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* race 0, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* race 1, *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-cucumerinum*, *Verticillium dahliae*, *Pythium aphanidermatum*, *Phytophthora parasitica* and the mycopathogen, *Verticillium fungicola* (Diáñez *et al.*, 2006), *Pythium ultimum* (St-Martin *et al.* (2012), *M. perniciosus* (agent pathogène responsable de la maladie du balais de sorcière chez le cacao) (Maridueña-Zavala *et al.*, 2019) et *Golovinomyces cichoracearum* DC (agent pathogène responsable du mildiou chez le melon) (Naidu et Siddiqui, 2012). L'effet inhibiteur est observé aussi bien avec du thé de compost aéré que non aéré (St-Martin *et al.*, 2012 ; Islam *et al.*, 2019).

4.1.2. Pomme de terre

La pomme de terre (*Solanum tuberosum*) est une culture importante et sensible à plusieurs maladies fongiques pouvant avoir des impacts majeurs sur le rendement. Le tableau 2 présente quelques études visant à évaluer le potentiel du thé de compost pour réduire le développement de plusieurs champignons pathogènes de la pomme de terre.

Tableau 2. Synthèse de quelques études sur le potentiel du thé de compost comme biopesticide pour la pomme de terre

référence	type de thé	type de compost	dilution et dose d'application	durée et fréquence d'application	modes d'application	résultats
Farrell, 1997	non aéré	compost de fumier et de litière	pas de dilution, 70gal US/ac	10 applications de mi-juin à mi-août	foliaire	Observation empirique au champ : pas de problème de mildiou (causé par <i>Phytophthora infestans</i>) après 21 ans de culture biologique de pomme de terre
Mengesha <i>et al.</i> , 2017	non aéré	compost commercial et compost de vigne	nd	application de gouttes sur des feuilles préalablement inoculées avec le champignon pathogène	foliaire	Inhibition de la croissance mycélienne de <i>Alternaria solani</i> et <i>Rhizoctonia solani</i> et réduction des lésions causées par <i>A. alternata</i> sur les feuilles
Samet <i>et al.</i> , 2018	aéré	compost de résidus agroalimentaires	nd	tous les 4 jours sur des racines préalablement inoculées avec <i>F. solani</i>	trempage racinaire	Inhibition de la croissance de <i>Fusarium solani</i> et amélioration de la réponse immunitaire à l'infection par <i>F. solani</i>
Sturz <i>et al.</i> , 2006	thé de compost commercial	nd	690L/ha	8 à 10 application de mi-juin à la récolte en octobre	foliaire	Protection inefficace du thé contre <i>Phytophthora infestans</i> malgré la présence dans le thé de microorganismes antagonistes de l'agent pathogène. Les populations microbiennes du thé ne sont pas maintenues sur la phyllosphère dans les jours suivant l'application.

4.1.3. Tomate

La grande sensibilité de la tomate (*Solanum lycopersicum* L.) à plusieurs maladies fongiques cause un recours important aux fongicides chimiques. Aussi plusieurs études ont évalué le potentiel du thé de compost comme biopesticide alternatif aux produits de synthèse. Le tableau 3 présente une synthèse de quelques-unes.

Tableau 3. Synthèse de quelques études sur le potentiel du thé de compost comme biopesticide pour la tomate

référence	type de thé	type de compost	dilution et dose d'application	durée et fréquence d'application	modes d'application	résultats
Nicol et Burlakoti, 2015	aéré	compost commercial de fumier de volaille et compost de champignons		In vivo : une application pré-inoculation ou deux applications : une pré et une post-inoculation avec <i>P. capsici</i>	In vitro / In vivo en serre : foliaire ou trempage	In vitro : réduction de la croissance de <i>Phytophthora capsici</i> avec les deux thés. Réduction de la croissance de <i>Botrytis cinerea</i> avec le thé de compost de champignons. In vivo : réduction du développement de la maladie, de 6,4% avec une pulvérisation foliaire à 73,4% avec deux trempages.
On <i>et al.</i> , 2015	non aéré	compost de fumier d'ovin	application d'antagonistes microbiens des agents pathogènes ciblés isolés à partir du thé	Traitement des fruits après ou avant inoculation avec <i>A. solani</i> et <i>B. cinerea</i>	In vitro	Inhibition de la croissance de <i>Alternaria solani</i> et <i>Botrytis cinerea</i> jusqu'à 60%. Augmentation de l'efficacité à faible dose grâce à une application préventive.
Pane <i>et al.</i> , 2012	aéré, extrait dans de l'eau ou dans du lactosérum	4 composts de résidus de tomates et 1 compost commercial de résidus verts	Dilution à 20%, 50% et 100% pour tests de germination et 1:1, 1:3 et 1:10 pour test de phytotoxicité foliaire	In vivo : une application pré ou post-inoculation avec <i>A. alternata</i> , <i>B. cinerea</i> et <i>P. lycopersici</i> .	In vitro/ In vivo : foliaire ou trempage	In vitro : inhibition de la croissance de <i>Alternaria alternata</i> , <i>Botrytis cinerea</i> et <i>Pyrenochaeta lycopersici</i> avec tous les thés. In vivo : réduction du développement des maladies avec tous les thés. Efficacité

						variable selon le milieu d'extraction. Dilution nécessaire pour éviter le risque de phytotoxicité liée à une trop forte concentration en sels et à un pH trop acide.
Segarra <i>et al.</i> , 2006	aéré	compost commercial de résidus verts	pas de dilution, dose nd	application pré ou post-inoculation avec <i>E. polygoni</i> , une fois par semaines pendant 5 semaines à partir de l'apparition des premiers symptômes de la maladie	In vivo, en serre : foliaire	Réduction de l'incidence de la maladie causée par <i>Erysiphe polygoni</i> de 19%.

4.1.4. Autres cultures

L'action du thé de compost est avérée chez une multitude d'autres cultures horticoles maraîchères, fruitières et ornementales pour réduire le développement et l'incidence de divers agents pathogènes : *Verticillium dahliae* responsable de la verticilliose chez la fraise (Li *et al.*, 2020), *Ralstonia solanacearum* responsable du flétrissement bactérien des solanacées chez l'aubergine (Islam *et al.*, 2013), *Botrytis cinerea* et *fabae* responsables de la pourriture grise du haricot (Ibrahim et El-Fiki, 2019 ; Palmer *et al.*, 2010), *Rhizoctonia solani* et *Phytophthora capsici* responsables de la fonte des semis chez les piments et poivrons (*Capsicum annuum* L.) (González-Hernández *et al.*, 2021), *Pythium ultimum* responsable de la fonte des semis chez le concombre (Scheuerell et Mahaffee, 2004), *Choanephora cucurbitarum* L. responsable de la pourriture des cucurbitacées chez l'okra (Siddiqui *et al.*, 2009), *Golovinomyces cichoracearum* DC responsable du mildiou chez le melon (Naidu *et al.*, 2012), *Botrytis cinerea* responsable de la pourriture grise et *Erysiphe necator* responsable du mildiou chez la vigne (Evans *et al.*, 2013) et *Sphaerotheca pannosa* var. *rosae* responsable du mildiou chez la rose (Seddigh *et al.*, 2014 ; Seddigh et Kiani, 2017).

En revanche, le thé de compost ne constituait pas une alternative jugée acceptable aux fongicides chimiques pour le contrôle de *Phytophthora nicotianae* var. *nicotianae* responsable de la pourriture du coeur de l'ananas (Sipes *et al.*, 2011).

4.2. Défense contre les ravageurs

Plusieurs études mettent en évidence l'efficacité de traitements de thés de vermicompost pour la réduction des dommages de nématodes parasites (*Meloidogyne incognita*), de tétranyque (*Tetranychus urticae*) et de puceron (*Myzus persicae*) chez la tomate en serre (Edwards *et al.*, 2007).

Edenborn *et al.* (2018) ont inoculé du biochar avec des thés provenant de différents composts et ont évalué l'effet sur des plants d'aubergines transplantés dans des pots contenant un mélange de sol et de 20% de biochar. "Aucun effet à court terme n'est observé sur la croissance des aubergines ou sur les dommages d'altise de l'aubergine (*Epitrix fuscula*) quand du biochar inoculé avec des thés de compost préparé à partir de compost de fumier de cheval, de champignon ou de vermicompost est appliqué au sol."

5. Impacts chimiques et biologiques du thé de compost sur le sol

Hall *et al.* (2006) attestent que l'application de thé de compost peut augmenter la vitesse de décomposition *in situ* des pailles de canne à sucre, en association avec le déchiquetage des résidus. Les auteurs estiment que cette méthode peut être utile dans des systèmes de production requérant de gérer un excès de résidus au champ.

Luo *et al.* (2021) mettent en évidence que l'épandage au champ de thé de compost acide permet d'augmenter la disponibilité du phosphore dans des sols calcaires. Deux mécanismes entrent en jeu : la dissolution du phosphore stable du sol et la réduction de la fixation du phosphore provenant des engrais organiques. Dans cette expérience, le traitement avec le thé de compost a également résulté en une augmentation du rendement de coton et une augmentation de l'efficacité d'utilisation du phosphore par la culture.

Huong *et al.* (2017) utilisent avec succès du thé de compost anaérobie comme solvant pour laver un sol sableux fortement contaminé par des dioxines. Les auteurs attribuent l'efficacité de décontamination du

sol obtenue à la forte concentration du thé de compost anaérobie en bio-surfactants non-ioniques, tels que des alcools et des acides humiques. L'efficacité de décontamination est influencée par plusieurs caractéristiques physico-chimiques du sol. Dans une étude sur la migration des organismes de TCA dans des sols limono-sableux et limono-argileux, Haller *et al.* (2016) mettent en évidence que, malgré une taille de particules favorable au transport microbien, le sol limono-sableux a retenu une plus grande proportion des microorganismes du thé de compost dans les 2 premiers cm du profil. Ce sol avait une densité volumique plus élevée que le sol limono-argileux, suggérant que la densité volumique est un facteur clef de migration des bactéries et des levures apportées par le thé dans la colonne de sol. Ainsi la bioremédiation des sols serait plus efficace dans des sols moins denses et plus riches en matière organique.

6. Risques sanitaires des thés de compost

6.1. Risques de contamination avec des pathogènes humains

Les recherches initiales sur les thés de compost dans les années 1980 et 1990 se concentrent essentiellement sur l'efficacité phytosanitaire de ces produits dans diverses cultures. Au début des années 2000, suite à des signalements de thés odorants ou soupçonnés de contenir *Escherichia coli*, et en réponse à la préoccupation sociétale générale par rapport à la salubrité des aliments biologiques, le département de l'Agriculture des États-Unis (USDA) crée le Compost Tea Task Force (Brinton *et al.*, 2004). En 2004, le Bureau national des normes biologiques mandate le Compost Tea Task Force pour faire une revue du risque de contamination de thés de compost par des organismes pathogènes pour les humains. Brinton *et al.* (2004) comparent l'approche européenne, "selon laquelle du compost de fumier est suspendu dans un baril d'eau avec agitation douce sur plusieurs jours", à l'approche moderne impliquant des extracteurs mécaniques, avec et sans additifs commerciaux. Aucun pathogène humain n'a été détecté dans les thés réalisés sans additifs. Dans les thés réalisés avec les extracteurs commerciaux, les bactéries aérobies et anaérobies ont été multipliées. Avec la méthode "européenne", les bactéries anaérobies ont augmenté en l'absence d'aération. Toutefois les *E. coli* inoculées ont diminué après 72h. Cette étude remet en cause la notion communément admise que l'absence d'agitation mène automatiquement à des conditions anaérobies.

Les conclusions sont que :

- Contrairement aux hypothèses de départ, aucune augmentation importante et continue d'*E. coli* n'a été observée.
- Si une petite quantité d'*E. coli* est introduite dans un thé, "sa population va diminuer jusqu'à disparition en 72 à 110 heures."
- Les seuls thés avec un haut niveau d'*E. coli* étaient ceux où une grande quantité avait été introduite au début, et ce avec ou sans aération.

Les auteurs estiment qu'il est donc possible que "des brassages courts, avec ajout de sucres, ont en effet pu représenter une des pratiques les moins sécuritaires". Le risque est particulièrement élevé dans le cas des thés préparés à partir de fumiers et appliqués sur les cultures peu avant la récolte. La meilleure approche pour éviter la présence d'*E. coli* dans les thés et sur les aliments est d'éviter l'introduction de microbes indésirables via l'inoculum au départ.

Ingram et Millner (2007) ont étudié les effets de l'ajout de suppléments nutritifs tels que des algues liquides, de l'hydrolysate de poisson, des acides humiques, de la poussière de roche et des solutions nutritives dans le processus de brassage de thé de compost sur la croissance d'organismes pathogènes. En l'absence d'ajout de suppléments nutritifs, aucun *E. coli* n'a été détecté après 8,5 jours d'extraction dans les thés non aérés et la concentration a diminué en dessous des seuils prescrits dans les thés oxygénés après 36h d'extraction. En revanche l'ajout de nutriments commerciaux a résulté en

l'augmentation d'*E. coli*, de salmonelle et de coliformes fécaux dans les deux types de thé. Lors d'ajout de nutriments, les concentrations de pathogènes sont restées plus élevées dans les thés aérés que dans les non aérés. Les auteurs recommandent donc de ne pas utiliser d'additifs nutritionnels lors de l'extraction pour le traitement de produits frais.

Le Compost Tea Task Force souligne que le respect des lignes directrices de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis sur la préparation des composts thermiques permet de réduire grandement le risque de développement de pathogènes humains dans les thés (NOSB, 2004 ; Durham, 2006). Pour le compost thermique, ces lignes directrices recommandent de maintenir les températures supérieures à 55°C pendant au moins 72h. Concernant les vermicomposts, la littérature scientifique suggère de respecter une durée de compostage d'au moins 50 jours.

6.2. Risques de phytotoxicité

Plusieurs caractéristiques chimiques du thé peuvent entraîner des effets de phytotoxicité : des molécules phytotoxiques, une salinité excessive, un pH bas.

Les bactéries anaérobies produisent des acides organiques volatiles, des alcools et des phénols toxiques pour les racines des plantes (Ingham, 2005). La détection de la présence, même importante, de bactéries anaérobies n'est toutefois pas forcément préoccupante puisque de nombreuses bactéries sont aérobies facultatives (Brinton *et al.*, 2004 ; Ingham, 2005). Cela signifie qu'elles peuvent présenter un métabolisme aérobie ou anaérobie selon la disponibilité en oxygène. Le facteur critique n'est donc pas leur présence en soi mais plutôt le mode de croissance qu'elles utilisent dans la solution. Brinton *et al.* (2004) rappellent que certaines bactéries anaérobies obligatoires nécessitent des taux extrêmement bas d'oxygénation (< 0,18mg/L d'air).

Carballo *et al.*, 2013 ont étudié spécifiquement l'influence sur la phytotoxicité du thé du type et de l'âge du compost ainsi que du régime d'aération et de la température lors de l'extraction et de la dilution avant application sur les plantes. Des tests de germination ont été menés selon la méthode de Zucchini. Tous les thés ont affecté négativement la croissance racinaire des laitues. Ce test a permis de comparer l'effet de différents thés et de mettre en évidence les facteurs influençant la phytotoxicité des thés : l'aération, la température et la stabilité du compost. Les auteurs suggèrent que la phytotoxicité pourrait être liée à la forte concentration d'acides organiques produits par des microbes en conditions anaérobies. En outre, l'extraction de ces acides phytotoxiques du compost augmente avec la température. Enfin Carballo *et al.* (2013) citent plusieurs études montrant que la phytotoxicité diminue pour des composts avancés dans le processus de compostage. En effet, au fil de la maturation du compost, les acides organiques (acétique, propionique et n-butyrique) sont cassés et le pH augmente (de 5-6 à 8-8,5).

Les tests de croissance représentent mieux le risque réel de phytotoxicité, puisqu'en conditions réelles le thé est souvent appliqué au sol tandis que dans le test de Zucchini les graines sont déposées sur un papier filtre imbibé de thé. Lorsque le thé a été appliqué sur le substrat, la croissance était plus importante qu'avec le témoin. A très fortes concentrations, les plants traités au thé présentaient une croissance égale à celle du témoin, malgré l'apport de nutriments fournis par le thé. Les auteurs pensent que la stimulation de croissance à faible concentration est liée à un apport de nutriment tandis que le plateau obtenu à forte concentration pourrait s'expliquer par la forte salinité. Dans un contexte d'application en serre, cet effet négatif pourrait être évité par l'effet de dilution créée par l'irrigation des cultures.

St-Martin *et al.* (2012) mettent en garde contre l'application fréquente de thés au pH bas (inférieur à 5,3) en fertigation. Cette pratique peut acidifier le substrat et produire des déficiences en calcium et magnésium ou une toxicité en manganèse.

La phytotoxicité causée par une salinité excessive et un pH trop acide est également mise en évidence par Kasim *et al.* (2021) et Pane *et al.* (2012).

7. Utilisation sur les fermes, de la théorie à la pratique

7.1. Impacts de la recette et de la méthode de production

La plupart des facteurs de variabilité du thé et de son efficacité biopesticide sont difficiles à mesurer. “L’identification et l’étude intensive de tous les microbes impliqués seraient requises pour être capable d’établir un standard” selon Nowers (2008). En l’absence d’analyses de laboratoire et de connaissances poussées en microbiologie et en phytopathologie, de nombreux utilisateurs de thés poursuivent souvent plutôt un objectif général de biodiversité maximale. La progression de la recherche et le partage d’expérience de terrain d’un nombre croissant d’agriculteurs a toutefois permis de développer plusieurs recettes propres à certaines cultures et visant le contrôle de certains agents pathogènes ou certaines fonctions biostimulantes précises. Ces recettes combinent l’extraction aqueuse artisanale de composts soigneusement réalisés pour procurer une activité biologique la plus diversifiée possible avec l’ajout, lors du brassage, d’additif nutritionnels ou d’agents de contrôle commerciaux spécifiques aux objectifs visés au champ (Dearborn, 2011 ; Devilliers, 2021). Les réseaux sociaux permettent d’augmenter la quantité et la portée des partages d’observations et mesures réalisées par des usagers à travers le monde et de faire évoluer en permanence les recettes utilisées. Cette création de connaissance à la croisée de la recherche conventionnelle et de la mise en commun d’expériences de terrain, avec application et rétroaction directe de la part des utilisateurs illustre bien la position d’agriculteur-chercheur de l’agroécologie (Doré *et al.*, 2006 ; Meynard *et al.*, 2001).

Toutefois, comme l’exprime Ingham (2005), “pour avoir constamment un thé bénéfique il faut savoir ce que vous faites, et cela signifie être capable de tester et de déterminer exactement quelle biologie est présente dans le thé.” Aussi de nombreux producteurs qui fabriquent leur propre thé se forment à l’observation au microscope, afin de pouvoir minimalement détecter les organismes pathogènes.

Islam *et al.* (2016) ont cherché à identifier la meilleure combinaison de paramètres d’extraction pour optimiser à la fois les caractéristiques chimiques et microbiologiques des thés. Les paramètres étudiés sont : le ratio compost-eau, le temps d’extraction, la durée et la température de stockage de thés. Le ratio compost/eau et la durée d’extraction ont impacté la teneur en nutriments. La durée de stockage a affecté les populations microbiennes mais seules les populations fongiques ont été affectées par la température de stockage. “Les résultats suggèrent que la meilleure combinaison des paramètres étudiés est : un ratio compost/eau de 1:2,5, un temps d’extraction de deux jours.

7.2. Défis de fabrication à la ferme

7.2.1. Qualité de l’inoculum

Le travail de Brinton *et al.* (2004) révèle que la plupart des composts disponibles sur le marché sont immatures et peu ou pas de tests de qualité sont menés. Or, dans les tests de Carballo *et al.* (2009) “l’utilisation de composts avec un faible degré de stabilité a produit des thés de compost avec un faible pH et une forte concentration en ammonium, qui ont causé des effets phytotoxiques [...] De plus, l’utilisation de composts ayant une conductivité électrique moyenne à élevée, tels que les composts de

fumier, ont produit des thés avec une très haute conductivité électrique, ce qui peut causer un effet négatif sur la croissance végétale.” Ainsi, les auteurs suggèrent de réaliser systématiquement un test de phytotoxicité avant de faire un traitement avec du thé de compost. Ils préconisent un test de croissance plutôt qu’un test de germination. En outre, la sensibilité variant d’une plante à l’autre, le test devrait être réalisé sur chaque culture où il est prévu d’appliquer le thé. Carballo *et al.* (2009) mettent également en évidence que l’aération continue et une température ambiante d’environ 20 degrés sont recommandées pour réduire le risque de phytotoxicité.

Ingham (1998), indique qu’une situation de croissance anaérobie dans un compost peut être rapidement soupçonnée si le produit a une odeur de vinaigre (acides acétiques), de lait aigre (acides butyriques), de vomit (acides valériques), d’œufs pourris (sulfure d’hydrogène) ou de putréfaction (alcools et phénols). Pour remédier à la situation, il faut réduire la proportion d’ingrédients riches en sucres simples et augmenter l’oxygénation en mélangeant le tas et en ajoutant du matériel en gros morceaux tels que de la paille, des journaux, des brindilles, des copeaux de bois, de la sciure de bois.

Elle affirme également qu’une fois les conditions aérobies rétablies, le compost ou le thé où des bactéries se sont développées dans des conditions anaérobies peut malgré tout être utilisé car les alcools et phénols phytotoxiques produits par le métabolisme bactérien anaérobie peuvent être dégradés par des organismes aérobies, un processus qui peut prendre deux semaines à un mois.

7.2.2. Équipements pour l’extraction

La méthode d’extraction passive traditionnelle requiert très peu d’équipements, facilement disponibles et très peu chers, à savoir un bon compost, un sac en tissu et un baril d’eau. La préparation de TCA requiert plus d’équipement, notamment une pompe permettant l’aération continue.

Riggle (1996) rapporte que depuis le début des années 1990, la compagnie californienne Organic Ag Advisors réalise de nombreux essais de thés de compost chez des producteurs en régie biologique. Le fondateur de la compagnie Amigo Bob Cantisano révélait alors que les premiers essais avec des extraits essentiellement anaérobies donnaient des résultats mitigés mais que l’expérience avait montré que plus le compost et le thé de compost était aérobies, meilleurs étaient les résultats au niveau du sol. Au fil des ans, les producteurs réalisant des thés de compost ont ainsi travaillé à améliorer leurs équipements pour augmenter l’oxygénation des produits. Cantisano explique que “plutôt que de laisser un sac de compost dans un baril plein d’eau, nous avons défini des manières de faire continuellement recirculer l’eau à travers le compost jusqu’à ce qu’il soit utilisé”.

Basé sur les observations au champs et sur les résultats du Soil Microbial Biomass Service de l’Université de l’Oregon, des cuves de brassage spécifiquement conçues pour la fabrication de TCA ont commencé à être commercialisées dans les années 1990 (Riggle, 1996). Aujourd’hui plusieurs compagnies proposent des équipements spécialisés pour la fabrication de TCA (Dearborn, 2011).

Brinton *et al.* (2004) ne constatent quant à eux pas d’avantages à utiliser des équipements d’aération mécanique pour la fabrication de thé de compost, du moment que le compost est de bonne qualité. “Cependant, puisque les agriculteurs peuvent fabriquer des thés à l’extérieur, dans des contenants mal nettoyés ou dans des endroits accessibles à des animaux et des oiseaux, et qu’il peut y avoir une exposition aux poussières, le risque de contamination peut être augmenté”. Les auteurs estiment que le type de technologie utilisé pour le brassage a peu d’importance et appellent en revanche les producteurs et les fabricants de compost à se concentrer sur la qualité du compost et les conditions d’hygiène dans lesquels ils sont fabriqués.

Des additifs nutritionnels peuvent également être ajoutés. Ceux-ci peuvent être produits à la ferme (ex : acides humiques, luzerne broyée) ou achetés dans le commerce (hydrolysats de poisson, algues liquides, acides humiques).

En ce qui concerne l'eau utilisée pour l'extraction ou pour la dilution du thé, elle ne doit pas contenir de chlore ou de chloramine. Ces produits, couramment ajoutés pour la désinfection de l'eau potable, peuvent inhiber la croissance et la propagation des microorganismes (Dearborn, 2011).

7.2.3. Paramètres d'application

Islam *et al.* (2016) mettent en évidence que le thé de compost devrait être utilisé immédiatement après l'extraction car les populations microbiennes diminuent avec le temps de stockage et ce dès une semaine en ce qui concerne les champignons et deux semaines en ce qui concerne les bactéries (figures 3). Si ce n'est pas possible, le stockage devrait être réalisé à basse température (4°C) plutôt qu'à température ambiante. Cela entraîne une difficulté pratique pour les opérations au champ.

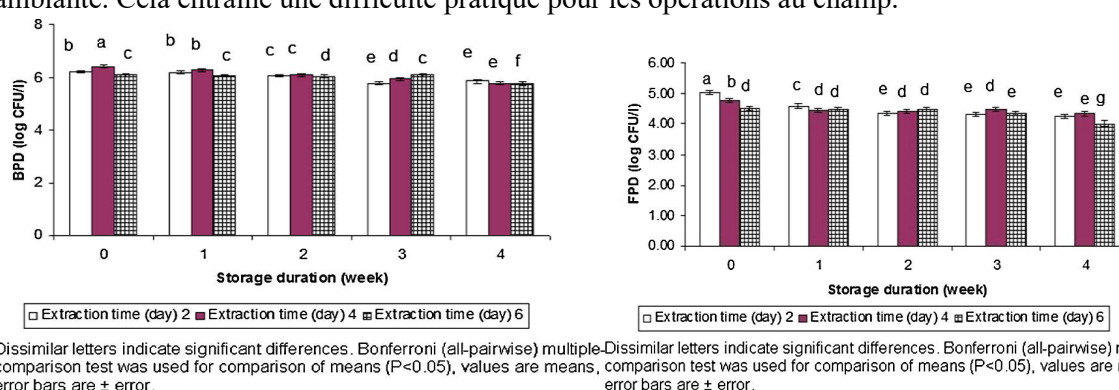


Figure 3.a. Effet de l'interaction entre la durée de stockage et le temps d'extraction sur la densité de population bactérienne du thé de compost (source : Islam *et al.*, 2016)

Figure 3.b. Effet de l'interaction entre la durée de stockage et le temps d'extraction sur la densité de population fongique du thé de compost (source : Islam *et al.*, 2016)

Edwards *et al.* (2007) confirment que “plus tôt le thé de vermicompost est utilisé après son brassage, plus son impact sur la croissance des plantes et le contrôle des maladies est important”.

En outre, “les pulvérisateurs et les systèmes d'irrigation au goutte à goutte peuvent être obstrués quand un thé très dense est utilisé en fertilisation”. Islam *et al.* (2016) suggèrent d'utiliser des systèmes d'irrigation de surface ou d'adapter des épandeurs de purins pour des applications au sol.

8. Suivi d'un essai d'extrait de compost en blé de printemps bio au Québec

8.1. Contexte et problématique

La ferme JA Paquin cultive des grandes cultures en régie biologique à Saint-Robert, au Québec. La rotation inclut du maïs, des céréales, du soya et des haricots secs. Les cultures sont fertilisées avec des lisiers de porc et de bovin laitier. Toutefois le recours aux fumiers est restreint car, ces engrais étant riches en phosphore, la couverture totale des besoins du maïs et des céréales avec cette source causerait un enrichissement excessif des sols en cet élément. La fertilisation azotée des cultures repose donc aussi sur l'utilisation d'engrais verts. L'apport d'une quantité optimale d'azote pour la culture de blé est un défi car les lisiers sont valorisés en priorité par le maïs, dont les besoins en azote et les revenus associés sont plus élevés, et il est difficile de placer un engrais vert en précédent de blé dans la rotation. Le

producteur souhaite tester l'efficacité biostimulante du thé de compost pour améliorer le rendement du blé sans augmenter la fertilisation organique.

8.2. Matériel et méthode

- Préparation du thé

L'inoculum utilisé est le compost commercial marin et forestier Bionik. Aucun additif nutritionnel n'a été ajouté. Le thé a été réalisé dans une cuve commerciale de 300 gallons imp. (1364L) avec aération mécanique et brassage en continu (figure 4). Le ratio compost/eau était d'environ 30L de compost pour 300gal d'eau (1:45). La durée d'extraction était de 45min. La cuve était installée à l'abri du soleil dans un hangar. Lors de la première extraction, le contrôle qualité de la présence de microorganismes bénéfiques aux plantes et de l'absence de pathogènes humains dans le thé a été réalisé par une personne du laboratoire de microbiologie DocTerre, par identification et comptage au microscope. Des ajustements ont été suggérés pour améliorer la qualité du produit et une deuxième extraction a été réalisée et validée par DocTerre. Pour les extractions suivantes, le producteur - ayant été formé à l'observation au microscope - a reproduit le protocole validé et a réalisé lui-même le contrôle qualité du produit. Le thé était appliqué immédiatement après préparation et aucune dilution n'était effectuée avant application.



Figure 4. Photo de la cuve utilisée pour la préparation du thé de compost

- Régie de culture

L'essai a eu lieu au champ en grandes parcelles de 8400m². Le sol est un loam sableux fin humifère Fleury. La culture était un blé de printemps de variété Hélios (variété hâtive, 70-90 jours de croissance au Québec) sur retour de soya. A l'automne précédent le champ avait reçu 40m³/ha de lisier de bovin laitier. Le lisier avait été incorporé au chisel. Un travail secondaire du sol a été réalisé au vibroculteur au printemps pour préparer le lit de semence. Le semis a eu lieu le 11 avril 2021. Le taux de semis était de 140kg/ha, soit une population semée de 389grains/m²¹. Le désherbage mécanique a consisté en un passage de herse étrille en pré-levée. Aucune fertilisation organique n'a été appliquée au cours de la

¹ PMG du Hélios = 36g (source : https://uniag.coop/wp-content/uploads/2019/11/Guide-de-semences-2020_Sollio-Agriculture.pdf)

saison de croissance. Le thé a été appliqué à l'aide d'un pulvérisateur traîné à rampe horizontale avec des buses à jet plat. Le blé a été récolté le 30 juillet 2021.

- Protocole d'application du thé

L'essai a comparé deux modalités : avec vs sans application de thé de compost (témoin), avec 3 répétitions. Dans les parcelles témoin, aucun traitement n'a été effectué. La disposition des parcelles a été déterminée de façon à éviter des biais de type de sol, d'ensoleillement (présence de haies matures autour de la parcelle) ou d'historique (travail de sol, précédent cultural, épandages d'engrais organiques ou d'amendements) (figure 5).

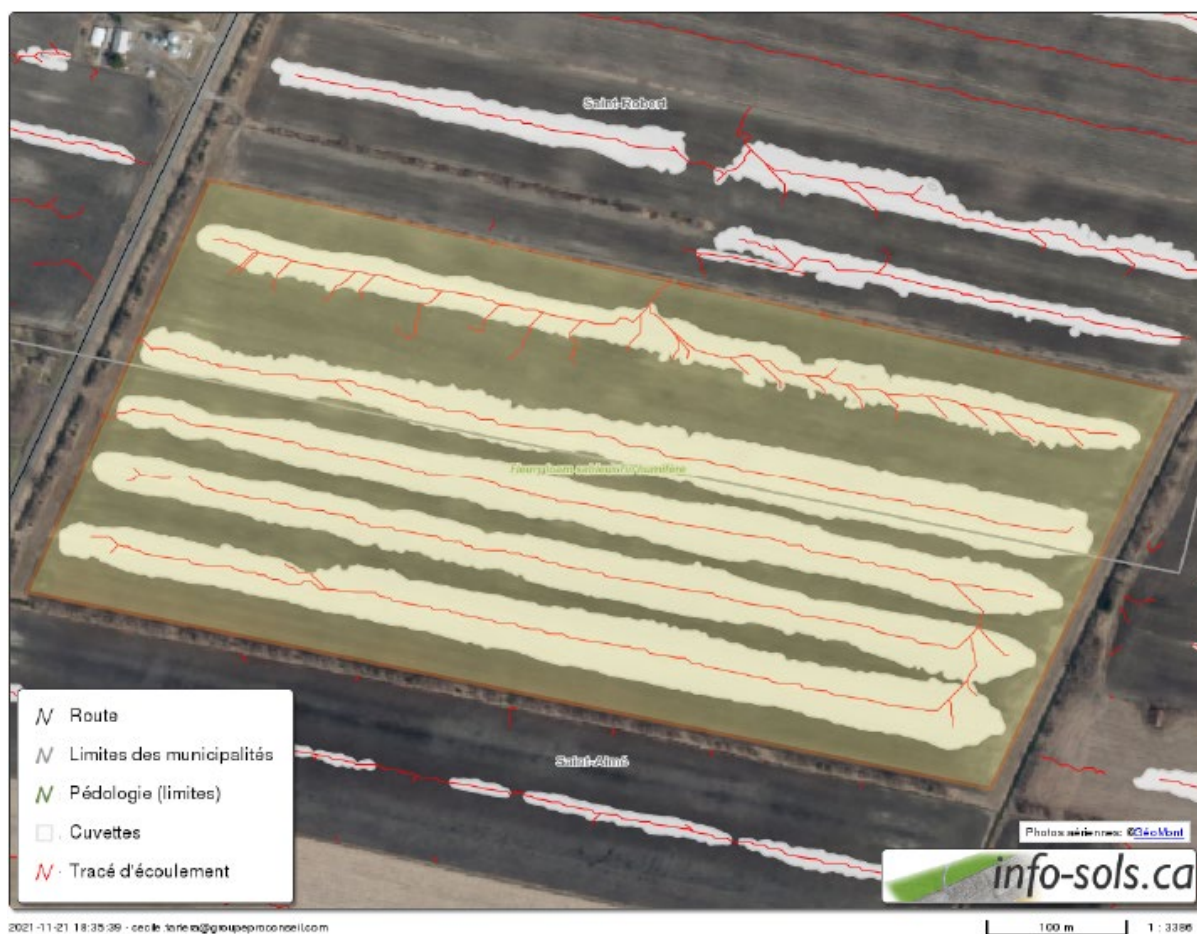


Figure 5. Localisation du champ de l'essai (en jaune) et données pédologiques et hydrographiques (source : infosols.ca)

L'essai a été mis en place alors que la culture était déjà au stade début montaison. Aucune application n'ayant été réalisée aux stades précoces d'établissement du rendement, aucun effet sur les pourcentages de germination et de levée (nombre de plants/m²) ne pouvait être attendu. En outre, il était trop tard pour évaluer l'impact potentiel des applications au stade tallage sur le nombre d'épis par plant. L'objectif était donc d'évaluer l'effet potentiel d'applications ultérieures de thé sur la grosseur et sur la qualité des grains. Ces informations ont été abordées via le rendement et des analyses du taux de protéines et de la concentration en toxines dans les grains.

La culture a reçu deux applications dans les parcelles “TCO” seulement : le 15 juin au stade montaison et le 22 juin au stade début épiaison. Ainsi, la première application a eu lieu entre les stades Zadock 32 et 37. Il est démontré qu’une application d’azote au stade 37 peut augmenter la teneur en protéines des grains. La seconde a été réalisée entre les stades Zadock 50 et 52, juste avant la période de remplissage des grains, qui se fait entre les stades 55 et 85. La dose était 23 galUS/ac soit 215L/ha.

Les paramètres qui ont été mesurés sont :

- Population : nombre de plants/m². Le comptage de population a été réalisé le 31 mai 2021. Il y avait 3 répétitions et 3 placettes de prise de données par répétition, donc un total de 9 prises de données par traitement.
- Nombre d’épis/plant (nombre d’épis/m² sur nombre de plants/m²). Le comptage des épis a été réalisé le 15 juillet 2021. Il y avait 3 répétitions et 3 placettes de prise de données par répétition, donc un total de 9 prises de données par traitement.
- Rendement en tonnes de matière sèche par hectare. Le rendement a été évalué au battage à l’aide du capteur de rendement Case IH AFS.
- Taux de protéines dans les grains. Un échantillon composite a été réalisé pour chaque parcelle, donc 3 échantillons par traitement. Les échantillons ont été réalisés par le producteur au moment de la récolte et l’analyse a été réalisée par le meunerie Les Moulins de Soulange.
- Concentration en toxines dans les grains. Un échantillon composite a été réalisé pour chaque parcelle, donc 3 échantillons par traitement. Les échantillons ont été réalisés par le producteur au moment de la récolte et l’analyse a été réalisée par la meunerie Les Moulins de Soulange.

La figure 6 présente le dispositif au champ de l’essai.

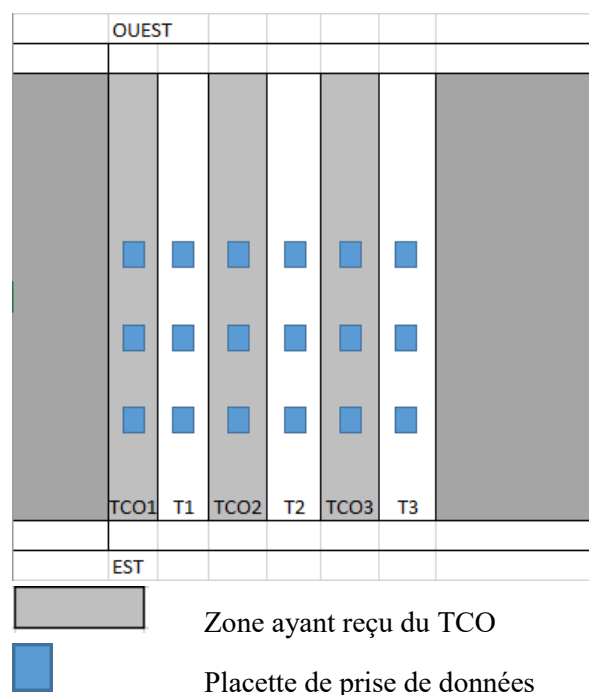


Figure 6. Schéma du dispositif de l’essai au champ (TCO = parcelle avec application de thé ; T = parcelle témoin)

8.3. Résultats

Le comptage de la population a été réalisé avant la première application de thé. La population était uniforme dans l'ensemble des parcelles, avec une population moyenne de 313 plants/m², soit un pourcentage de levée moyen de 81%, ce qui est conforme à la garantie du fournisseur (tableau 4). Le comptage des épis a été réalisé juste avant la récolte, après les deux applications de thé. Le nombre moyen d'épis par plant était de 1 épi/plant et n'a pas été affecté par l'application de thé (tableau 4).

Tableau 4. Population et nombre d'épis de blé dans les parcelles, avant application de thé (plants/m² et épis/m²)

	TCO	Témoin
rép 1	377	416
	354	343
	377	304
rép 2	427	292
	337	399
	253	315
rép 3	242	208
	169	264
	321	242
moyenne	317	309
écart-type	81	69

Les rendements obtenus dans les parcelles traitées au thé de compost sont à l'intérieur de la variabilité interne du témoin (tableau 5).

Tableau 5. Rendements de blé dans les parcelles avec thé vs sans (tonnes de ms/ha à 15% d'humidité)

	TCO	Témoin
rép 1	1735	1650
rép 2	1842	1967
rép 3	1606	1612
moyenne	1727	1743
écart-type	118	195

Aucun impact n'a été constaté sur la teneur en protéines ni sur la concentration en toxines des grains (tableau 6).

Tableau 6. Résultats d'analyse de grains réalisés par la meunerie

Variété	Proche infra-rouge sur grains						Poids spécifique (kg/hl)	Impuretés (%)	Indice chute (sec)
	Humidité (%)	Protéines MS (%)	Amidon MS (%)	Zélny MS (%)	Gluten Humide (%)	Protéines 14% (%)			
T1	14,1	13,98	70,15	53,3	27,1	12,02	80,1	0,49	406
T2	14,1	14,11	69,71	55,5	27,4	12,13	80,1	0,5	417
T3	14,2	14,19	69,6	56,6	27,6	12,20	80,1	0,54	420
TCO1	14,1	13,85	69,76	54,1	26,8	11,91	80,1	0,44	413
TCO2	14,0	14,13	69,57	56,1	27,5	12,15	80,1	0,57	424
TCO3	14,0	14,33	69,47	57,5	27,9	12,33	80,1	0,4	413

Broya de grains			Glutopeak						
Humidité (%)	Protéines 14% (%)	Cendres 14 %	PMT (s)	BEM (BE)	A (0-1)	A (1-2)	A (2-3)	A (3-4)	A (4,5)
13,6	12,00	1,481	79	56	79	29	561	535	741
13,72	12,07	1,573	75	56	77	66	476	522	729
13,74	11,95	1,602	72	58	241	36	386	555	735
13,65	11,94	1,597	72	57	150	21	442	549	714
13,48	11,97	1,504	79	56	243	45	422	588	721
13,61	11,98	1,505	76	58	79	29	562	567	740

8.4. Analyse

Aucun effet positif ou négatif du traitement avec le thé de compost sur le rendement ni sur la qualité des grains n'a été mis en évidence. Plusieurs améliorations pourraient être apportées au protocole pour réaliser un futur essai avec ces objectifs :

- A la lumière de la présente revue de littérature, il est possible que le temps d'extraction ait été trop court pour permettre une population suffisante de microorganismes d'intérêt.

- L'essai pourrait également être répété avec davantage d'applications au cours de la saison de culture. Les applications pourraient être ciblées à des stades clefs pour les différentes composantes du rendement. Par exemple : enrobage de semences puis pulvérisation au stade début tallage, Zadock 30, Zadock 37, Zadock 52 et pendant le remplissage des grains. "Au stade 30, tout le tallage significatif est habituellement complété. Les talles subséquentes ne produisent habituellement pas d'épis fertiles. [...] Les applications d'engrais [azoté] au stade 30 influencent le nombre et la grosseur des grains sur l'épi (rendements). Par contre, à ce stade-ci, l'engrais n'a aucun effet sur le nombre d'épis par plant." (Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario, l'Université de Guelph et Bayer CropScience, sd). Il faut toutefois prendre en compte que ces derniers stades sont atteints à une période de l'année où les températures dépassent fréquemment les 25 degrés, ce qui augmente la vitesse de multiplication microbienne dans la cuve de brassage et le risque de développement de conditions anaérobies.
- Pour être rigoureux, il faudrait en outre faire une application du volume équivalent d'eau avec le pulvérisateur dans les parcelles témoin.
- Les conditions de sécheresse estivales ont pu nuire à la survie des microorganismes une fois le produit appliqué, et ce d'autant plus que le thé n'était pas activé par l'ajout d'additifs nutritionnels et qu'aucun surfactant n'a été utilisé.
- Au vu de la présente revue de littérature, il serait intéressant de tester l'impact sur le rendement d'applications de thé de compost combinées avec des épandages d'engrais organiques solides au cours de la saison de culture.

9. Conclusion

9.1. État des lieux actuel

Des essais en champ, des tests en laboratoire et des témoignages de producteurs suggèrent que ces substances permettent d'attester du potentiel de ces substances pour le contrôle des maladies des plantes et pour des effets biostimulant. En 2004, Kelley estime que bien que la recherche ait commencé dans le milieu des années 1980, "les résultats d'essais contrôlés en champs sont encore rares et ceux qui existent sont souvent contradictoires". Selon (Brinton *et al.* (2004), "le domaine du thé de compost aux États-Unis a eu un développement accidenté et discontinu. Peut-être que beaucoup de confusion aurait pu être évitée si plus d'attention avait été donnée à de précédentes publications et si plus d'échanges avaient eu lieu entre les producteurs actuels et les praticiens traditionnels."

La majorité des études ont été réalisées avec des thés non aérés et en 2002 Scheuerell et Mahaffee attestent qu'il y a encore très peu de données comparant directement l'efficacité phytosanitaire de thés aérés ou non. Compte-tenu du manque de tests en laboratoire et d'essais au champ structurés, ainsi que de la variabilité des produits, Nowers (2008) explique qu'il est difficile de répondre à la question "Est-ce que le thé de compost sera efficace contre la maladie X dans la culture Y?". Malgré la progression de la recherche sur ce sujet depuis les années 2000, ce constat est encore vrai aujourd'hui. Bien que le potentiel du thé de compost pour le contrôle d'une multitude de maladies fongiques dans de nombreuses cultures soit avéré, la constance des résultats fait encore défaut à l'heure actuelle. Les résultats de l'expérience de Brinton *et al.* (2004) montrent clairement que "l'impression donnée par la presse populaire comme quoi les moyens de faire du thé de compost sont bien établis et accessibles à travers des recettes ou formules simples n'est pas supportée par aucun résultat pratique ou scientifique". Selon Dearborn (2011), "augmenter la diversité microbienne sans comprendre le rôle de chaque espèce dans le contexte de l'environnement naturel de la plante peut être risqué mais est un concept qui nécessite des investigations plus poussées dans le cadre d'essais structurés au champ".

9.2. Perspectives

Le potentiel biostimulant et biopesticide du thé de compost est établi pour de nombreuses cultures en serre et en plein champ. La présente revue de littérature a permis de constater que les recherches récentes sur le sujet visent à déterminer quels sont les facteurs de préparation et d'application permettant d'obtenir un résultat favorable et constant.

Les thés ont surtout été étudiés pour leur potentiel de contrôle des maladies fongiques. Le niveau de contrôle de la maladie n'atteignant pas toujours celui des fongicides chimiques, l'efficacité peut être jugée insuffisante pour une entreprise en production conventionnelle mais quand même appréciable pour une ferme en production biologique, qui dispose de moins d'options de produits de phytoprotection et bénéficie d'une plus grande valeur ajoutée sur les productions (Scheuerell et Mahaffee, 2002).

Les thés de compost sont aussi envisagés pour réduire l'usage de fertilisants et d'engrais chimiques sur des terrains très fréquentés par le public, tels que les golfs (Grobe, 2003 ; Nilsson, 2005) et des parcs municipaux, tel que Central Park (Brown, 2005).

Scheuerell et Mahaffee (2002) résument bien les perspectives de recherche en ce qui concerne l'utilisation à la ferme des thés de compost : "Une meilleure compréhension de la microbiologie du thé de compost et de la survie et des interactions des microorganismes sur les surfaces des plantes devrait permettre de modifier les pratiques de production de thé de compost et les technologies d'application pour optimiser l'application d'une microflore avec de multiples modes de lutte contre les pathogènes. Des agriculteurs et des praticiens innovants mènent le développement de nouvelles méthodes et utilisations de thé de compost, générant de nombreuses opportunités de recherche. L'utilisation de thé de compost dans le cadre d'une stratégie de gestion intégrée des ennemis des cultures nécessitera beaucoup plus de recherche holistique par une équipe collaboratrice d'agriculteurs et d'experts en compostage, en phytopathologie, en écologie moléculaire microbienne, en science des fermentations, des plantes, en sélection variétale, en science du sol et en horticulture".

Bibliographie

- Abd-Alrahman, H. A., & Aboud, F. S. (2021). Response of sweet pepper plants to foliar application of compost tea and dry yeast under soilless conditions. *Bulletin of the National Research Centre*, 45(1), 119. <https://doi.org/10.1186/s42269-021-00578-y>
- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Dick, R., & Dick, L. (2007). Vermicompost Tea Production and Plant Growth Impacts. *BioCycle*, 48(11), 51-52.
- Bali, R., Pineault, J., Chagnon, P.-L., & Hijri, M. (2021). Fresh Compost Tea Application Does Not Change Rhizosphere Soil Bacterial Community Structure, and Has No Effects on Soybean Growth or Yield. *Plants*, 10(8), 1638. <https://doi.org/10.3390/plants10081638>
- Bess, V. H. (2000). Understanding Compost Tea. *BioCycle*, 41(10), 71.
- Brinton, W., Storms, P., Evans, E., & Hill, J. (2004). Compost teas : Microbial hygiene and quality in relation to method of preparation. *J Biodynam*, 2.
- Brown, M. (2005). Compost Tea in Central Park : An Update. *BioCycle*, 46(7), 59-60.
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2016). Amendements organiques - composts. (CAN/BNQ 0413-200).
- Carballo, T., Gil, M. V., Calvo, L. F., & Morán, A. (2009). The Influence of Aeration System, Temperature and Compost Origin on the Phytotoxicity of Compost Tea. *Compost Science & Utilization*, 17(2), 127-139. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2009.10702411>
- Commission chimie et fertilité des sols (CCFS). (2010). Guide de référence en fertilisation, 2e édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 473.
- Dearborn, Y. (2011). Compost tea. Literature review on production, application and plant disease management. Prepared for San Francisco Department of Environment Toxic Reduction Program: IPM Task Order # 3-18.
- Devillier, J.C. (2021). Thés de compost oxygénés et enrobages bio-stimulants de semences. Formation donnée en visioconférence les 4 et 12 mars 2021.

- Diáñez, F., Santos, M., Boix, A., de Cara, M., Trillas, I., Avilés, M., & Tello, J. C. (2006). Grape Marc Compost Tea Suppressiveness to Plant Pathogenic Fungi : Role of Siderophores. *Compost Science & Utilization*, 14(1), 48-53. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2006.10702262>
- Doré, T, Le Bail, M, Martin, P, Ney, B & Roger-Estrade, J. (2006). L'agronomie aujourd'hui. Versailles : Éditions Quae. 367.
- Durham, S. (2006). Additives Boost Pathogens in Compost Tea. *Agricultural Research*, 54(9), 22-22.
- Edenborn, S. L., Johnson, L. M. K., Edenborn, H. M., Albarran-Jack, M. R., & Demetris, L. D. (2018). Amendment of a hardwood biochar with compost tea : Effects on plant growth, insect damage and the functional diversity of soil microbial communities. *Biological Agriculture & Horticulture*, 34(2), 88-106. <https://doi.org/10.1080/01448765.2017.1388847>
- Edwards, C. A., Arancon, N. Q., Emerson, E., & Pulliam, R. (2007). Suppressing Plant Parasitic Nematodes and Arthropod Pests with Vermicompost Teas. *BioCycle*, 48(12), 38-39.
- El-Gizawy, E., Shalaby, G., & Mahmoud, E. (2014). Effects of Tea Plant Compost and Mineral Nitrogen Levels on Yield and Quality of Sugar Beet Crop. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(9), 1181-1194. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.874028>
- Eudoxie, G. D., Khan, F., & Martin, M. (2017). Effects of compost tea source and application method on lettuce (*Lactuca sativa*) yield and nutrient content, grown in a vermicompost amended medium. *Acta Horticulturae*, 1168, 175-184. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1168.23>
- Eudoxie, G., Grogan, K., Beckford, M., & Martin, M. (2019). Compost tea influence on lettuce (*Lactuca sativa* L.) root architecture. *Acta Horticulturae*, 1266, 79-88. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1266.12>
- Evans, K. J., Palmer, A. K., & Metcalf, D. A. (2013). Effect of aerated compost tea on grapevine powdery mildew, botrytis bunch rot and microbial abundance on leaves. *European Journal of Plant Pathology*, 135(4), 661-673. <https://doi.org/10.1007/s10658-012-0103-5>
- Farrell, M. (1997). Applying compost tea to prevent potato blight. *BioCycle*, 38(5), 53.
- Fortin, A. (2020). BIO-7904 : Écologie intégrative des symbioses végétales. Notes du cours partie 4, module 10. Université Laval.

- González-Hernández, A. I., Suárez-Fernández, M. B., Pérez-Sánchez, R., Gómez-Sánchez, M. Á., & Morales-Corts, M. R. (2021). Compost Tea Induces Growth and Resistance against *Rhizoctonia solani* and *Phytophthora capsici* in Pepper. *Agronomy*, 11(4), 781. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040781>
- Grobe, K. (2003). Golf Courses Find Value in Compost Tea Programs. *BioCycle*, 44(10), 22.
- Hakim, A., Khatoon, M., & Gullo, S. (2020). Effect of compost tea and partial root zone drying on tomato productivity and quality. *Advances in Horticultural Science*, 33(4). <https://doi.org/10.13128/ahsc-8129>
- Hall, S. G., Schellinger, D. A., & Carney, W. A. (2006). Enhancing Sugarcane Field Residue Biodegradation By Grinding and Use of Compost Tea. *Compost Science & Utilization*, 14(1), 32-39. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2006.10702260>
- Haller, H., Jonsson, A., Rayo, K. M., & López, A. D. (2016). Microbial transport of aerated compost tea organisms in clay loam and sandy loam – A soil column study. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 106, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.002>
- Hargreaves, J. C., Adl, M. S., & Warman, P. R. (2009). The Effects of Municipal Solid Waste Compost And Compost Tea on Mineral Element Uptake And Fruit Quality of Strawberries. *Compost Science & Utilization*, 17(2), 85-94. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2009.10702406>
- Hirzel, J., Cerda, F., Millas, P., & France, A. (2012). Compost Tea Effects on Production and Extraction of Nitrogen in Ryegrass Cultivated on Soil Amended With Commercial Compost. *Compost Science & Utilization*, 20(2), 97-104. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2012.10737032>
- Hung, W., Huang, W.-Y., Lin, C., Vu, C. T., Yotapukdee, S., Kaewlaoyoong, A., Chen, J.-R., & Shen, Y.-H. (2017). The use of ultrasound-assisted anaerobic compost tea washing to remove poly-chlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs), dibenzo-furans (PCDFs) from highly contaminated field soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(23), 18936-18945. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9517-0>
- Ibrahim, H. A. K., & El-Fiki, I. A. I. (2019). Study on the effect of yeast in compost tea efficiency in controlling chocolate leaf spot disease in broad bean (*Vicia faba*). *Organic Agriculture*, 9(2), 175-188. <https://doi.org/10.1007/s13165-018-0221-2>
- Ingham, E. (1998). Anaerobic bacteria and compost tea. *BioCycle*, 39(6), 86.

- Ingham, E. (1999a). What Is Compost Tea? *BioCycle*, 40(3), 74.
- Ingham, E. (1999b). Making a High Quality Compost Tea. *BioCycle*, 40(4), 94.
- Ingham, E. (2005). The compost tea brewing manual, 5th ed. Corvallis (OR): Soil Foodweb. 91.
- Ingham, E. & Alms, M. (2003). The compost tea brewing manual, 4th ed. Corvallis (OR): Soil Foodweb. 88.
- Ingram, D. T., & Millner, P. D. (2007). Factors Affecting Compost Tea as a Potential Source of *Escherichia coli* and *Salmonella* on Fresh Produce†. *Journal of Food Protection*, 70(4), 828-834. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-70.4.828>
- Islam, M. K., Yaseen, T., Traversa, A., Ben Kheder, M., Brunetti, G., & Coccozza, C. (2016). Effects of the main extraction parameters on chemical and microbial characteristics of compost tea. *Waste Management*, 52, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.042>
- Islam, M. R., Mondal, C., Hossain, I., & Meah, M. B. (2013). Compost tea as soil drench : An alternative approach to control bacterial wilt in brinjal. *Archives Of Phytopathology And Plant Protection*, 47(12), 1475-1488. <https://doi.org/10.1080/03235408.2013.847654>
- Islam, R., Sultana, S., Islam, M. R., & Mondal, C. (2019). Effect of aerated and non-aerated compost tea against some fungal phytopathogens : Effect of compost tea against fungal phytopathogens. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, 17(2), 142-147.
- Kasim, N., Mustari, K., Iswari, I., Nasaruddin, Padjung, R., & Widiayani, N. (2021). Effect of the application of chicken manure compost tea on the growth of certified cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedlings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 807(4), 042050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/807/4/042050>
- Kelley, S. (2004). Building a Knowledge Base for Compost Tea. *BioCycle*, 45(6), 32-34.
- Kim, M. J., Shim, C. K., Kim, Y. K., Hong, S. J., Park, J. H., Han, E. J., Kim, J. H., & Kim, S. C. (2015). Effect of Aerated Compost Tea on the Growth Promotion of Lettuce, Soybean, and Sweet Corn in Organic Cultivation. *The Plant Pathology Journal*, 31(3), 259-268. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.02.2015.0024>

- Lanthier, M., & Peters, S. (2013). Microbial content of actively aerated compost tea after variations of ingredients or procedures. *Acta Horticulturae*, 1009, 219-224.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1009.26>
- Li, X., Wang, X., Shi, X., Wang, Q., Li, X., & Zhang, S. (2020). Compost tea-mediated induction of resistance in biocontrol of strawberry *Verticillium* wilt. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 127(2), 257-268. <https://doi.org/10.1007/s41348-019-00290-0>
- Loffredo, E., & Senesi, N. (2009). In vitro and in vivo assessment of the potential of compost and its humic acid fraction to protect ornamental plants from soil-borne pathogenic fungi. *Scientia Horticulturae*. (Amsterdam) 122 (3), 432-439 <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2009.05.030>.
- Luo, T., Zhu, Y., Lu, W., Chen, L., Min, T., Li, J., & Wei, C. (2021). Acidic compost tea enhances phosphorus availability and cotton yield in calcareous soils by decreasing soil pH. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 1-10.
<https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1933161>
- Maridueña-Zavala, M. G., Freire-Peñaherrera, A., Espinoza-Lozano, R. F., Villavicencio-Vasquez, M., Jimenez-Feijoo, M., & Cevallos-Cevallos, J. M. (2019). Genetic characterization of *Moniliophthora perniciosa* from Ecuador and in vitro sensitivity to compost tea. *European Journal of Plant Pathology*, 154(4), 943-959. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01714-1>
- Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants, second edition*. London: Academic Press. 889.
- Mazzola, M. & Freilich, S. (2016). Prospects for Biological Soilborne Disease Control : Application of Indigenous Versus Synthetic Microbiomes. *Phytopathology*, 107 (3), 256-263.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-16-0330-RVW>
- Mengesha, W. K., Gill, W. M., Powell, S. M., Evans, K. J., & Barry, K. M. (2017). A study of selected factors affecting efficacy of compost tea against several fungal pathogens of potato. *Journal of Applied Microbiology*, 123(3), 732-747. <https://doi.org/10.1111/jam.13530>
- Meynard, J.M., Doré, T. & Habib, R. (2001). L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *C R Acad Agric Fr*, 87 (4): 223–236.

Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario, l'Université de Guelph et Bayer CropScience. (sd). Un guide de champs sur les stades de croissance des céréales.

Naidu, Y., Meon, S., & Siddiqui, Y. (2012). In vitro and in vivo evaluation of microbial-enriched compost tea on the development of powdery mildew on melon. *BioControl*, 57(6), 827-836. <https://doi.org/10.1007/s10526-012-9454-2>

Naidu, Y., Meon, S., & Siddiqui, Y. (2013). Foliar application of microbial-enriched compost tea enhances growth, yield and quality of muskmelon (*Cucumis melo* L.) cultivated under fertigation system. *Scientia Horticulturae*, 159, 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.04.024>

Nicol, R. W., & Burlakoti, P. (2015). Effect of aerobic compost tea inputs and application methods on protecting tomato from phytophthora capsici. *Acta Horticulturae*, 1069, 229-233. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1069.32>

Nilsson, J. (2005). Using Biological Methods in the Golf Industry. *BioCycle*, 46(6), 28-29.

Nowers, L. (2008). Compost tea : An independent view on its control of plant diseases. *Agriprobe*, 5(3), 8-9. https://doi.org/10.10520/AJA18109799_122

National Organic Standards Board. (2004). *Compost Tea Task Force Report*. 20.

Ochoa-Martínez, E., Figueroa-Viramontes, U., Cano-Ríos, P., Preciado-Rangel, P., Moreno-Resendez, A., & Rodríguez-Dimas, N. (2009). Compost tea as organic fertilizer in the production of greenhouse tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(3). <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2009.15.034>

On, A., Wong, F., Ko, Q., Tweddell, R. J., Antoun, H., & Avis, T. J. (2015). Antifungal effects of compost tea microorganisms on tomato pathogens. *Biological Control*, 80, 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.09.017>

Palmer, A. K., Evans, K. J., & Metcalf, D. A. (2010). Characters of aerated compost tea from immature compost that limit colonization of bean leaflets by *Botrytis cinerea*. *Journal of Applied Microbiology*, 109(5), 1619-1631. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04794.x>

Pane, C., Celano, G., Villecco, D., & Zaccardelli, M. (2012). Control of *Botrytis cinerea*, *Alternaria alternata* and *Pyrenochaeta lycopersici* on tomato with whey compost-tea applications. *Crop Protection*, 38, 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.03.012>

- Pane, C., Palese, A. M., Celano, G., & Zaccardelli, M. (2014). Effects of compost tea treatments on productivity of lettuce and kohlrabi systems under organic cropping management. *Italian Journal of Agronomy*, 9(3), 153-156. <https://doi.org/10.4081/ija.2014.596>
- Pant, A. P., Radovich, T. J. K., Hue, N. V., & Paull, R. E. (2012). Biochemical properties of compost tea associated with compost quality and effects on pak choi growth. *Scientia Horticulturae*, 148, 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.09.019>
- Radin, A. M., & Warman, P. R. (2011). Effect of Municipal Solid Waste Compost and Compost Tea as Fertility Amendments on Growth and Tissue Element Concentration in Container-Grown Tomato. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(11), 1349-1362. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.571742>
- Riggle D. (1996). Compost teas in agriculture. *BioCycle* 37, 65–67.
- Ros, M., Hurtado-Navarro, M., Giménez, A., Fernández, J. A., Egea-Gilabert, C., Lozano-Pastor, P., & Pascual, J. A. (2020). Spraying Agro-Industrial Compost Tea on Baby Spinach Crops : Evaluation of Yield, Plant Quality and Soil Health in Field Experiments. *Agronomy*, 10(3), 440. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030440>
- Ryan, M., Wilson, D., Hepperly, P., Travis, J., Halhrendt, N., & Wise, A. (2005). Compost Tea Potential Is Still Brewing. *BioCycle*, 46(6), 30-32.
- Samet, M., Charfeddine, M., Kamoun, L., Nouri-Ellouze, O., & Gargouri-Bouزيد, R. (2018). Effect of compost tea containing phosphogypsum on potato plant growth and protection against *Fusarium solani* infection. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(19), 18921-18937. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1960-z>
- Samet, M., Karray, F., Mhiri, N., Kamoun, L., Sayadi, S., & Gargouri-Bouزيد, R. (2019). Effect of phosphogypsum addition in the composting process on the physico-chemical proprieties and the microbial diversity of the resulting compost tea. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(21), 21404-21415. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05327-3>
- Scheuerell, S. (2003). Understanding How Compost Tea Can Control Disease. *BioCycle*, 44(2), 20.

Scheuerell, S. J., & Mahaffee, W. F. (2004). Compost Tea as a Container Medium Drench for Suppressing Seedling Damping-Off Caused by *Pythium ultimum*. *Phytopathology*®, 94(11), 1156-1163. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.11.1156>

Scheuerell, S. J., & Mahaffee, W. F. (2002). Compost Tea : Principles and Prospects For Plant Disease Control. *Compost Science & Utilization*, 10(4), 313-338. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702095>

Scheuerell, S. J., & Mahaffee, W. F. (2006). Variability Associated with Suppression of Gray Mold (*Botrytis cinerea*) on Geranium by Foliar Applications of Nonaerated and Aerated Compost Teas. *Plant Disease*, 90(9), 1201-1208. <https://doi.org/10.1094/PD-90-1201>

Scotti, R., D'Agostino, N., Pane, C., & Zaccardelli, M. (2016). Humic acids and compost tea from compost for sustainable agriculture management. *Acta Horticulturae*, 1146, 115-120. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1146.15>

Seddigh, S., & Kiani, L. (2018). Evaluation of different types of compost tea to control rose powdery mildew (*Sphaerotheca pannosa* var. *Rosae*). *International Journal of Pest Management*, 64(2), 178-184. <https://doi.org/10.1080/09670874.2017.1361050>

Seddigh, S., Kiani, L., Tafaghodinia, B., & Hashemi, B. (2014). Using aerated compost tea in comparison with a chemical pesticide for controlling rose powdery mildew. *Archives Of Phytopathology And Plant Protection*, 47(6), 658-664. <https://doi.org/10.1080/03235408.2013.817075>

Segarra, G., Reis, M., Casanova, E., & Trillas, M. I. (2009). Control of powdery mildew (erysiphe polygoni) in tomato by foliar applications of compost tea. *Journal of Plant Pathology*, 91(3), 683-689.

Siddiqui, Y., Meon, S., Ismail, R., & Rahmani, M. (2009). Bio-potential of compost tea from agro-waste to suppress *Choanephora cucurbitarum* L. the causal pathogen of wet rot of okra. *Biological Control*, 49(1), 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.11.008>

Sipes, B. S., Taniguchi, G., & Radovich, T. (2011). Vermicompost tea and bth effect on pineapple heart rot. *Acta Horticulturae*, 902, 373-376. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.902.43>

Solihah, Z., Sudantha, I. M., & Fauzi, M. T. (2016). Utilization of biomol and tea compost solution fermented by the fungus *Trichoderma spp.* on the growth of soybean (*Glycine Max (L.) Merr.*) in dry land. *Simbiosis*, 4(2). <https://ojs.unud.ac.id/index.php/simbiosis/article/view/28753>

St. Martin, C. (2014). Potential of compost tea for suppressing plant diseases. *CAB Reviews Perspectives in Agriculture Veterinary Science Nutrition and Natural Resources*, 9, 1-38. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20149032>

St. Martin, C. C. G., & Brathwaite, R. A. I. (2012). Compost and compost tea : Principles and prospects as substrates and soil-borne disease management strategies in soil-less vegetable production. *Biological Agriculture & Horticulture*, 28(1), 1-33. <https://doi.org/10.1080/01448765.2012.671516>

St. Martin, C. C. G., Dorinvil, W., Brathwaite, R. A. I., & Ramsubhag, A. (2012). Effects and relationships of compost type, aeration and brewing time on compost tea properties, efficacy against *Pythium ultimum* , phytotoxicity and potential as a nutrient amendment for seedling production. *Biological Agriculture & Horticulture*, 28(3), 185-205. <https://doi.org/10.1080/01448765.2012.727667>

Sturz, A. V., Lynch, D. H., Martin, R. C., & Driscoll, A. M. (2006). Influence of compost tea, powdered kelp, and Manzate® 75 on bacterial-community composition, and antibiosis against *Phytophthora infestans* in the potato phylloplane. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 28(1), 52-62. <https://doi.org/10.1080/07060660609507270>

Villecco, D., Pane, C., Ronga, D., & Zaccardelli, M. (2020). Enhancing Sustainability of Tomato, Pepper and Melon Nursery Production Systems by Using Compost Tea Spray Applications. *Agronomy*, 10(9), 1336. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091336>

Walker, R., Rossall, S. & Asher, M. J. C. (2002). Colonization of the developing rhizosphere of sugar beet seedlings by potential biocontrol agents applied as seed treatments. *Journal of Applied Microbiology*, 92 (2), 228-237. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2002.01523.x>

Zaccardelli, M., Pane, C., Villecco, D., Palese, A. M., & Celano, G. (2018). Compost tea spraying increases yield performance of pepper (*Capsicum annuum* L.) grown in greenhouse under organic farming system. *Italian Journal of Agronomy*, 13(3), 229-234. <https://doi.org/10.4081/ija.2018.991>