

Assessment of waste biodegradability and composts stability by the Respirometry

Évaluation de la biodégradabilité des déchets et de la stabilité des composts par Respirométrie

C. KEFFALA^{1*}, F. ZOUHIR², M. HENI¹, H. JUPSIN², Y. M'SADAK¹

¹ Université de Sousse, Institut Supérieur Agronomique de Chott-Mariem, Département du Génie des Systèmes Horticoles et du Milieu Naturel, BP 47, CP 4042, Tunisie

² Université de Liège, Faculté des Sciences, Unité Assainissement et Environnement, 185 Avenue de Longwy, B6700 Arlon, Belgique

*Corresponding author: keffalachema@yahoo.fr

Abstract – Biodegradability characterization of organic substrates before composting and stability assessment of composts under controlled conditions are key issues for better monitoring and optimization of composting processes. A static respirometric method has been implemented to characterize the biodegradability of a mixture of organic wastes (M1 and M2) composed of green waste of *Acacia*, cattle manure and sheep manure with different proportions and to assess the stability of two composts (C1 and C2) collected at two stages of maturation (compost C1: 8 months, compost C2: 5 months) under controlled conditions of temperature and humidity. Obtained results show similar respirometric profiles for the two mixtures M1 and M2 with oxygen consumption rate nearly close: 1.74 and 1.70 mol O₂/kg of initial DM, respectively for M1 and M2. The composts stability was assessed using two standard methods (ISSEP and AT₄). The comparison of experimental results to stability thresholds fixed by these methods leads to different conclusions. The stability of compost C1 (8 months aged) was confirmed by ISSEP method unlike the AT₄ method. However, the compost C2 (5 months aged) is considered still young according to the two methods considered.

Keywords: Biodegradability, Organic matter, Static Respirometry, Compost, Stability.

Résumé – La caractérisation de la biodégradabilité des substrats organiques avant compostage et l'évaluation de la stabilité des composts en conditions contrôlées sont des enjeux clés pour un meilleur suivi et pour l'optimisation des procédés de compostage. Une méthode respirométrique statique a été mise en œuvre pour caractériser la biodégradabilité de deux mélanges de déchets organiques (M1 et M2) composés de déchets verts d'*Acacia*, fumier bovin, et fumier ovin avec des proportions différentes, d'une part, et d'autre part pour évaluer la stabilité de deux composts (C1 et C2) prélevés à deux stades de maturation (compost C1 : 8 mois, compost C2 : 5 mois), dans des conditions contrôlées de température et d'humidité. Les résultats obtenus montrent des profils respirométriques similaires pour les deux mélanges M1 et M2 avec des taux de consommation d'oxygène proches de l'ordre de 1,74 et 1,70 mol O₂/kg MS initiale, respectivement pour les mélanges M1 et M2. La stabilité des composts a été évaluée, en utilisant deux méthodes normalisées (Test ISSEP et Test AT₄). La comparaison des résultats expérimentaux aux seuils de stabilité fixés par ces méthodes a abouti à des conclusions distinctes. La stabilité du compost C1 (âgé de 8 mois) a été confirmée par la méthode ISSEP, contrairement à la méthode AT₄. En revanche, le compost C2 (âgé de 5 mois) est considéré comme encore jeune selon les deux méthodes considérées.

Mots clés : Biodégradabilité, Matière organique, Respirométrie statique, Compost, Stabilité.

1. Introduction

Actuellement, les politiques environnementales tendent de plus en plus à favoriser les voies biologiques de traitement des déchets organiques, étant donné que leur gestion est une préoccupation croissante, le compostage en est une. Il s'agit d'une véritable filière industrielle qui se développe avec des demandes spécifiques par tant les opérationnels du compostage que ses usagers. Le compostage est généralement



simplement défini comme le processus de biodégradation aérobie de la matière organique sous l'action des microorganismes, conduisant à une matière organique plus stable : le compost (Haug 1995 ; Mason 2007). Il s'applique aussi bien aux déchets ménagers et assimilés (fraction fermentescible des ordures ménagères, boues d'épuration, déchets verts) qu'aux déchets agricoles et agroalimentaires. Ce procédé permet d'obtenir un produit riche en composés humiques valorisable par retour au sol sans impact négatif sur l'environnement.

Avec l'aide des réacteurs pilotes qui reproduisent les conditions physiques qui seront celles pratiquées lors du compostage, les scientifiques se sont concentrés à évaluer la fraction biodégradable, à travers des tests de biodégradabilité des déchets, grâce à la méthode respirométrique. Cette méthode consiste à suivre la consommation d'oxygène et/ou de la production de CO₂ par les microorganismes aérobies pour définir un potentiel de biodégradation (Gomez et al. 2006 ; Malinska 2016).

Les tests de biodégradabilité aérobie et anaérobie ont été utilisés par de nombreux auteurs sur des substrats de nature variée. Les résultats de ces tests ont montré une variabilité importante des résultats selon la nature des déchets et selon les auteurs, principalement pour les déchets frais. Les tests anaérobies ont été développés, dans un premier temps, afin d'évaluer le comportement des déchets en conditions d'enfouissement pour déterminer leur biodégradabilité, ainsi que leur potentiel de production de biogaz (Inbar et al. 1989 ; Owens et al. 1993). Les essais aérobies ont principalement été développés pour caractériser la réactivité et la stabilité de déchets compostés ou prétraités mécaniquement et biologiquement (Bidlingmaier et al. 1999 ; Cossu et al. 2001).

De ce fait, l'outil respirométrique est utilisé à différents points clés du processus de compostage. L'évaluation de la biodégradabilité du substrat (déchet) au début du traitement peut orienter la formulation de mélanges de substrats optimums pour augmenter le rendement. En fin de compostage, l'outil respirométrique permet de quantifier le niveau de stabilisation du compost, une condition nécessaire de maturité.

Plusieurs indicateurs de stabilité basés sur l'évolution physique, chimique et biologique des composts ont été relevés dans la littérature (De Bertoldi et al. 1982; Saviozzi et al. 1988 ; Eglisias-Jimnez et Perez-Garcia 1989 ; Avnimelech et al. 1996). Du fait de leur estimation directe de l'activité microbienne, les méthodes respirométriques sont considérées comme étant les méthodes d'évaluation de la maturité les plus fiables (Scaglia et al. 2000).

Les tests basés sur la consommation d'oxygène peuvent être classés notamment selon le mode d'aération employé : de nombreux auteurs distinguent ainsi les tests réalisés en conditions statiques des tests en conditions dynamiques (Lasaridi et Stentiford 1989 ; Stegmann et Heyer 2001 ; Ferreira et al. 2006).

En conditions statiques, le matériau à tester est placé dans un flacon clos et l'oxygène présent dans la phase gazeuse est consommé par l'activité bactérienne. Cette consommation est suivie par mesure directe des variations du taux d'oxygène par chromatographie gazeuse ou grâce à des sondes spécifiques ou encore à l'aide de mesures manométriques qui permettent de suivre la dépression liée à la consommation d'oxygène et, par la même, le volume d'oxygène consommé. Le dioxyde de carbone produit est capté à l'aide d'un piège alcalin (solution ou pastilles de soude) placé dans la phase gaz du flacon réactionnel et la dégradation se déroulant à volume constant. Pour ce type de respiromètre, le taux d'oxygène dans le milieu peut devenir le facteur limitant la dégradation et nécessite une attention particulière (Druilhe et al. 2007).

En conditions dynamiques, l'indice de respiration dynamique (DRI, « Dynamic Respiration Index ») a été proposé par Adani et al. (2001). Dans ces conditions, le matériau à l'état solide, humidifié à sa capacité de rétention en eau, est placé en réacteur et aéré en permanence par un flux d'air le traversant. Deux sondes à oxygène, l'une en entrée de réacteur et l'autre en sortie, ainsi qu'un dispositif de mesure du débit et de la température permettent la détermination du taux de consommation en oxygène (Stegmann et Heyer 2001).

Comme nous l'avons vu précédemment, de nombreux tests d'évaluation de la biodégradabilité de composés organiques font l'objet de méthodes normalisées, spécifiquement adaptées à l'analyse de matrices différentes. Ces tests ont pour vocation d'établir les critères d'acceptabilité du produit fini (compost) ou des déchets destinés à l'enfouissement. D'autres tests ont pour objectifs de caractériser finement la matière organique, ce qui permettra le développement des systèmes de traitement de plus en plus efficaces. De plus, en vue de s'assurer que seules les caractéristiques du substrat dégradé conditionnent le résultat des tests, ces méthodes permettent de maîtriser la plupart des facteurs d'influence susceptibles de modifier les réponses expérimentales.

Dans le présent travail, la méthode respirométrique statique a été retenue pour étudier, d'une part, la biodégradabilité de deux mélanges de déchets de différentes origines, et d'autre part, la stabilité de deux composts d'âges différents.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Matrices organiques étudiées

Quatre substrats organiques dont deux mélanges de Biomasses d'origine végétale (Broyat de petits rameaux d'*Acacia cyanophylla*, riche en Biomasse foliaire), et animale (Fumiers bovin et ovin), ainsi que deux composts sylvicoles ayant des âges différents (C1 âgé de 5 mois, C2 âgé de 8 mois) ont été étudiés.

Avant de composer les mélanges, les substrats (*Acacia cyanophylla*, fumier bovin et fumier ovin), ainsi que les échantillons de compost ont été préalablement séchés à l'air libre, puis broyés successivement à l'aide de deux broyeurs distincts de laboratoire, afin d'obtenir des particules de diamètre inférieur à 20 mm. Tous les échantillons (mélanges (M1 et M2) et composts) ont été tamisés par la suite, à travers un tamis de mailles 12 mm, et conditionnés dans des flacons plastiques étanches. Ceux-ci ont été finalement stockés dans une chambre froide à 4°C.

Les mélanges (M1 et M2) ont été élaborés en se basant sur le rapport (C/N) de chaque déchet, en vue d'obtenir un rapport C/N du mélange de l'ordre de 25 (+/- 5). Les rapports C/N des déchets (*Acacia cyanophylla*, fumiers bovin et ovin) déterminés selon la littérature sont respectivement : 25, 20 et 20 (Zneidi 2002). Ainsi, les deux mélanges confectionnés pour la mise en compostage sont les suivants :

Mélange M1 : 1/2 Broyat *Acacia cyanophylla* + 1/4 Fumier bovin + 1/4 Fumier ovin

Mélange M2 : 1/3 Broyat *Acacia cyanophylla* + 1/3 Fumier bovin + 1/3 Fumier ovin

2.2. Méthodes d'analyse physico-chimiques des substrats organiques

Des analyses physico-chimiques, telles que la matière sèche (MS), la teneur en eau, la densité et la matière volatile (MV), ont été réalisées sur des échantillons prélevés à partir des mélanges M1 et M2, ainsi que des échantillons de compost (C1 et C2) mis à l'étude.

Les substrats M1 et M2 ont été soutirés avant compostage au niveau du Domaine Agricole rattaché à l'Institut Supérieur Agronomique (ISA) de Chott-Mariem (Sousse, Tunisie). Les substrats C1 et C2 ont été collectés au niveau des deux andains de compost, confectionnés sur la plate-forme de compostage aménagée au niveau de la Pépinière Forestière Moderne (PFM) de Chott-Mariem, à partir des branches d'*Acacia cyanophylla* (de diamètre inférieur ou égal à 6 cm) ayant subi un double broyage séparé au moyen d'un broyeur simple à couteaux, ensuite, d'un broyeur simple à marteaux (à la grille de calibrage avec mailles à trous ronds de 30 mm de diamètre).

Les teneurs en matière sèche (MS) et matière volatile (MV) ont été déterminées selon les normes (AFNOR, 1987) [18]. La teneur en MS est déduite de la teneur en eau mesurée par perte de masse de l'échantillon après passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. La matière volatile (MV) est déterminée par mesure de la perte de masse de l'échantillon après calcination à 550°C dans un four à moufle pendant au moins 4 heures. La densité par rapport à l'eau représente le rapport de la masse d'un certain volume d'un corps à celle du même volume d'eau.

2.3. Mise en œuvre des essais respirométriques des substrats organiques

L'étude de biodégradabilité des deux mélanges (M1 et M2), ainsi que l'étude de la stabilité des deux composts (C1 et C2) ont été accomplies par des méthodes respirométriques à l'Unité Assainissement et Environnement de la Faculté des Sciences (Université de Liège, Belgique). Le dispositif respirométrique adopté est constitué de cellules respirométriques (Bouteilles DURAN). Chaque cellule possède un volume intérieur de 2 litres. La cellule contenant le substrat à étudier, est maintenue à 20°C dans une chambre thermostatée, et est munie d'un adaptateur, qui sert à maintenir un capteur de pression CMC Series Compact Capacitance Diaphragm Gauge ultra-sensible pour mesurer la pression d'air au sein de la cellule. Les capteurs sont reliés à un voltmètre qui à son tour branché à un Data Logger pour l'acquisition des données (mesures de tension et température) en continu. Ces mesures de tension sont converties en mesures de pression, grâce à une courbe d'étalonnage fournie par le constructeur. Une table magnétique est conçue pour l'agitation des échantillons contenus dans les bouteilles respirométriques. Un ordinateur est utilisé pour commander le début et la fin des manipulations, ainsi

que l'enregistrement des mesures (tension et température) via une interface. La concentration en oxygène est déterminée suivant la loi des gaz parfaits décrite selon l'équation 1 suivante :

$$n_{O_2} = \frac{PV}{RT}$$

Avec n_{O_2} : nombre de moles d'oxygène en moles ; P : Pression en mbar, V : Volume libre de la bouteille en l et T : Température en °K (Kelvin) ; R : constante des gaz parfaits, valeur égale à 0,082057338 en l atm K⁻¹ mol⁻¹

Le volume libre de la phase gazeuse de chaque bouteille est déterminé préalablement après pesée de la bouteille remplie d'eau à 100%. Étant donné que la densité de l'eau est de 1000 kg/m³, on obtient donc le volume réel de la bouteille en divisant la masse sur 1000. Connaissant les densités des échantillons, ainsi que les masses à introduire, les volumes des échantillons ont été déduits. Ainsi, le volume libre de la bouteille, autrement appelé le volume de la phase gazeuse constitue la différence entre le volume réel de la bouteille et le volume de l'échantillon.

2.1. Étude de la biodégradabilité des substrats organiques

L'étude de la biodégradabilité a porté sur des échantillons prélevés à partir des mélanges M1 et M2 et a été réalisée à travers le suivi de la consommation d'oxygène par la méthode respirométrique. La méthodologie de mise en œuvre des essais est similaire que celle utilisée dans le cas de l'étude de la stabilité (relatée dans ce qui suit), sauf que dans le cas de l'étude de la biodégradabilité, le test est mené sur des échantillons solides (15 g) jusqu'à consommation totale de la matière organique attestée par une stabilisation de la consommation d'oxygène. D'autre part, l'humidité de ces échantillons solides a été ajustée à 60%.

2.2. Étude de la stabilité des composts

Deux méthodes ont été utilisées pour l'étude de la stabilité du compost : celle proposée par l'ISSEP (méthode proposée par le Compendium Wallon des Méthodes d'Echantillonnage et d'Analyse : CWMEA), et celle qui correspond au Test AT4. Ces deux méthodes diffèrent par les conditions de mise en œuvre.

Selon la méthode ISSEP, une première série de mesures respirométriques a été réalisée en duplicatas sur les échantillons de compost C1 (âge 8 mois) et C2 (âge 5 mois). Environ 10 g de chaque échantillon de compost est placé dans la cellule respirométrique au moyen d'un entonnoir. Une solution minérale de volume 200 ml, ainsi que 1,25 ml de solution d'allylthiourée ont été rajoutés par la suite. Un barreau magnétique assure l'agitation continue. De l'oxygène pur est préalablement flashé durant environ 15 secondes dans la phase gazeuse de la bouteille. Immédiatement après ajout d'oxygène, le respiromètre muni d'une capsule contenant 2,5 g de pastilles de chaux sodée pour capter le CO₂ dégagé est placé dans l'incubateur sur un agitateur. Enfin, les mesures de dépression sont enregistrées à des intervalles de temps régulier pendant une durée d'incubation de 5 jours comme le prévoit cette méthode. Le pH a été vérifié au début et à la fin de l'expérimentation. Parallèlement aux échantillons de compost, un essai à blanc contenant la solution minérale a été mis en œuvre dans les mêmes conditions.

Selon la méthodologie du Test AT₄, une deuxième série de mesures respirométriques a été réalisée en duplicatas sur les échantillons de compost C1 (âge 8 mois) et C2 (âge 5 mois). Ces échantillons dont l'humidité a été ajustée à 55% ont été laissés à l'air libre pendant une nuit pour acclimater les bactéries avant le démarrage du test. Pour cette série d'expérience, une quantité de 20g de chaque échantillon de compost est placée dans la cellule respirométrique, de l'oxygène pur est préalablement flashé dans la phase gazeuse de la bouteille et le CO₂ dégagé est capté par les pastilles de chaux.

Enfin, les mesures de dépression sont enregistrées à des intervalles de temps réguliers pendant une durée d'incubation de 4 jours. Les teneurs en matière sèche et de matière volatile des composts ont été mesurées au début et à la fin de l'expérimentation.

3. Résultats et discussion

3.1. Caractérisation physico-chimique des substrats organiques considérés

Le rapport entre la masse en carbone et la masse en azote (rapport C/N) du déchet à traiter est crucial pour le processus de biodégradation aérobie (Pujol 2012). Le rapport C/N optimal est, dans une certaine mesure, fonction de la nature des déchets, et particulièrement, des composants carbonés. Mais, il ne tient cependant pas compte de la disponibilité réelle du carbone et de l'azote considérés, ce qui fait qu'une

valeur durapport C/N autour de 25-30 n'est pas nécessairement le gage d'un équilibre nutritionnel adéquat. C'est en effet la disponibilité de l'azote et du carbone contenus dans la matière qui va déterminer la capacité d'utilisation de ces composés par les microorganismes (Berthe 2007).

Les teneurs en matière sèche des substrats étudiés restent élevées avec des moyennes qui varient entre 82,92 et 90,78% (Tableau 1). De telles valeurs restent relativement voisines.

Par ailleurs, les déchets d'agro-industrie et les déchets d'agriculture présentent des teneurs en matière organique (MO) élevées avec des proportions respectives de 51,19 ; 60,25 ; 30,83 et 42,01 (Tableau 1) respectivement pour les mélanges M1 et M2 et les composts C1 et C2.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques des substrats mis à l'essai

Substrats	C/N (estimé)	Matière sèche (%)	Teneur en eau (%)	Densité	Matière organique (%)
Mélange M1	22,5	88,72	11,28	0,17	51,19
Mélange M2	21,6	90,78	9,22	0,34	60,25
Compost C1		82,92	17,08	0,51	30,83
Compost C2		89,60	10,40	0,47	42,01

3.2. Tests de biodégradabilité des substrats organiques non compostés

La dégradation aérobie de la matière organique présente l'avantage d'être directement corrélée à l'activité microbienne (Komilis et al. 2011). Pour cela, l'étude des activités microbiennes permet d'appréhender la dynamique des différentes modifications biochimiques. La mesure d'activité microbienne la plus utilisée pour étudier les composts et les substrats organiques est la respiration. Celle-ci exprimée en quantité d'O₂ consommée est souvent utilisée, d'une part, comme indice de stabilité des composts, et d'autre part, comme moyen d'évaluation de leur biodégradabilité (Stegmann et Heyer 2001).

Les tests de biodégradabilité ont été considérés sur les mélanges de déchets d'origine végétale et animale. La durée de ces essais est de 14 jours. Les figures 1, 2, 3 et 4 illustrent l'évolution du taux de respiration maximale (rO₂ max), exprimé en mmol O₂/h/kg MS initiale en fonction du temps.

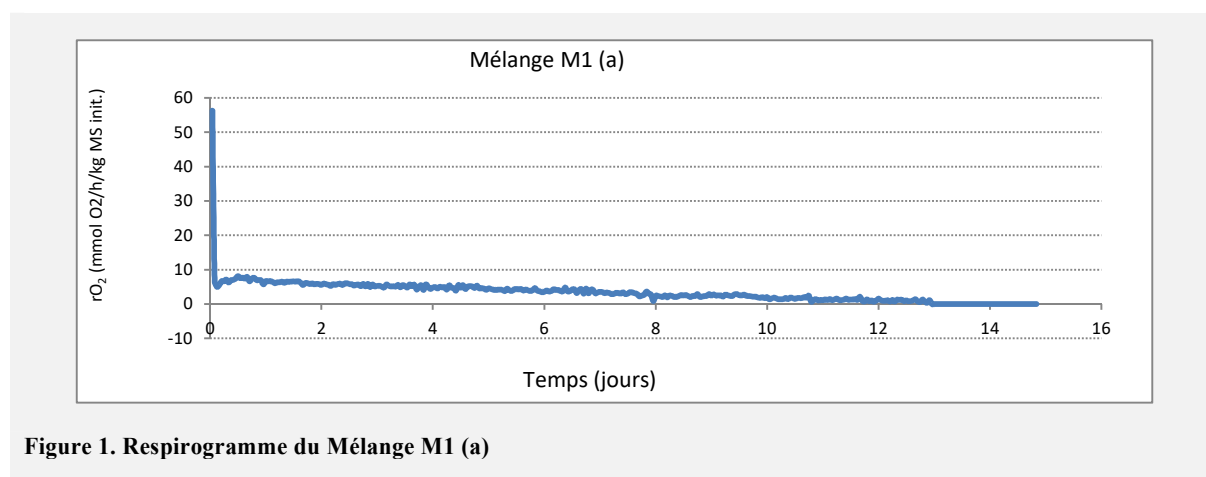


Figure 1. Respirogramme du Mélange M1 (a)

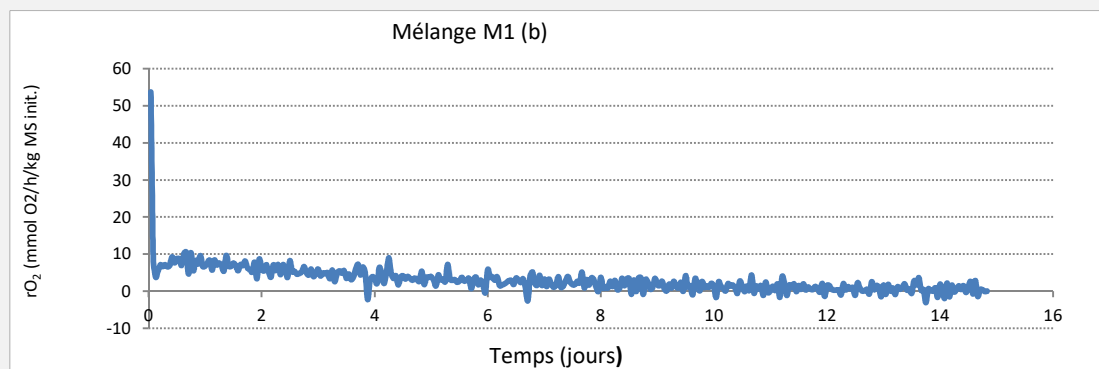


Figure 2. Respirogramme du Mélange M1(b)

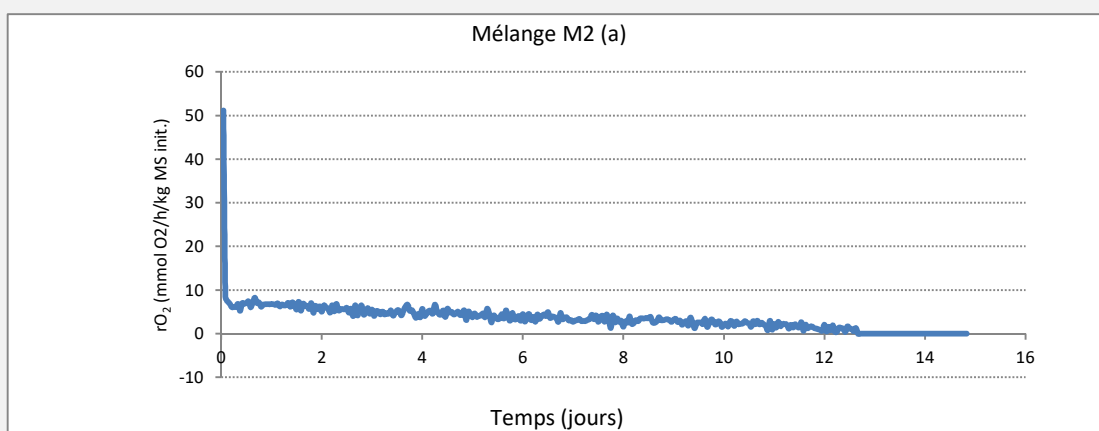


Figure 3. Respirogramme du Mélange M2(a)

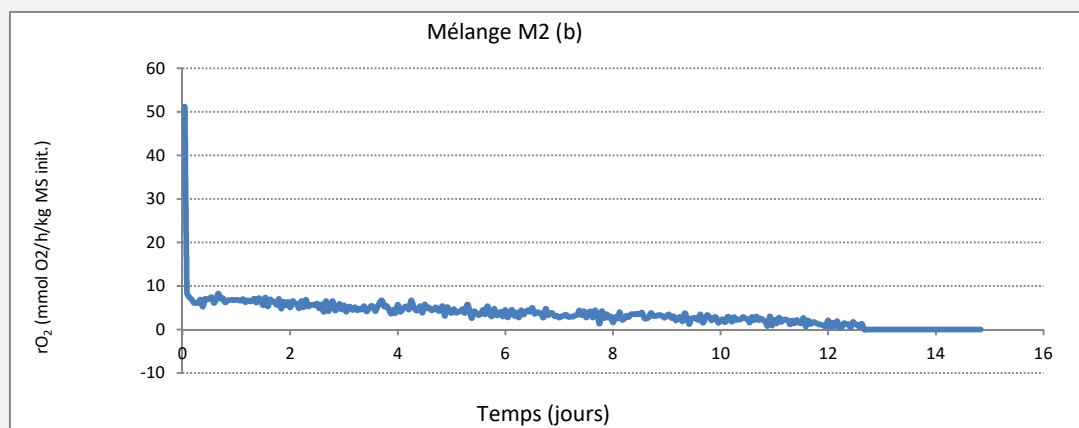


Figure 4. Respirogramme du Mélange M2(b)

La variation de la respiration exprimée en mmol O_2 /h/kg MS init. en fonction du temps des mélanges étudiés est comparable. Le taux de respiration maximale est atteint après seulement quelques heures du début de l'expérimentation, puis l'activité biologique diminue rapidement jusqu'à prendre une valeur quasi-constante durant le reste du suivi. Ce comportement indique la présence d'une faible proportion de matière organique facilement biodégradable qui amorce l'activité biologique, mais certes sur un

temps court. La diminution progressive ultérieure de cette activité correspond à l'hydrolyse d'une fraction plus récalcitrante de la matière organique. La biodégradabilité de la fraction lentement biodégradable est certes limitée par cette phase d'hydrolyse (Charnay 2005). Un tel signal respirométrique caractérise généralement des substrats difficilement biodégradables. Cependant, de nombreux auteurs pensent que ce comportement pourrait être dû à une faible concentration en oxygène, vu qu'une concentration en oxygène importante est nécessaire, notamment durant la phase de dégradation de la matière facilement biodégradable. Selon Richard et al. (2002), cette phase où la dégradation est la plus importante est la phase durant laquelle l'oxygène est le principal facteur limitant. La consommation totale d'oxygène lors des tests respirométriques réalisés, exprimée en moles d'oxygène consommé par kg de matière sèche initiale ou en mg d'oxygène par kg de matière sèche initiale est présentée dans le tableau 2. Cette consommation correspond à la somme des variations du nombre de moles d'oxygène entre deux instants consécutifs. Dans le cas de nos essais, les quantités totales d'oxygène consommé varient entre 2,24 et 1,25 mol O₂/kg MS initiale. Ce paramètre est en corrélation avec la quantité de matière organique biodégradable existante dans le substrat étudié. La détermination de l'oxygène total consommé présente un intérêt essentiel sur le plan opérationnel, en effet ce paramètre déterminé lors de la caractérisation respirométrique des déchets permet de calculer le volume d'air à injecter lors de son traitement par compostage.

Duirhe et al. (2007) ont défini trois classes de matière biodégradable initiale contenue dans les substrats : Classe I avec une consommation cumulée supérieure à 20 mol O₂/kg MS initiale, classe II avec une consommation comprise entre 10 et 20 mol O₂/kg MS initiale, classe III avec une consommation inférieure à 10 mol O₂/kg MS initiale. Selon cette classification, les matières biodégradables contenues dans les mélanges M1 et M2 correspondent à la classe III.

Le taux de respiration maximale (rO₂ max) (mmol O₂/h/kgMS) a été enregistré lors du démarrage de l'essai.

Tableau 2. Oxygène total consommé, classe de quantité de matière biodégradable initiale, rO₂ max. des substrats étudiés

Déchets étudiés	O ₂ total consommé (mol O ₂ /kg MS initiale)	Quantité d'O ₂ totale consommée (mg O ₂ /kg MS)	Classe de quantité de matière biodégradable initiale	rO ₂ max. (mmol O ₂ /h/kgMS)
Mélange M1 (a)	1,25	39,86	III	56,25
Mélange M1 (b)	2,24	71,71	III	53,68
Mélange M2 (a)	1,56	49,88	III	68,89
Mélange M2 (b)	1,85	59,15	III	51,12

Classe III : O₂ total consommé inférieur à 10 mol O₂/kg MS initiale.

Aucune phase de latence n'a été observée, cela indique que la population microbienne s'est rapidement adaptée et son activation s'est déclenchée juste après le démarrage de l'essai, grâce aux conditions optimales de température et d'humidité. Le pic respirométrique correspondant à la vitesse maximale de consommation d'oxygène permet d'estimer le débit d'air à fournir rapidement après le démarrage du traitement par compostage pour ne pas ralentir les cinétiques de la réaction de biodégradation.

Druilhe et al. (2007) ont appliqué la méthode respirométrique pour caractériser des déchets de nature différente tels que les déchets verts, marcs de raisin, ordures ménagères, boues urbaines et boues d'abattoir, refus de centrifugation de lisier de porcs et de volailles et les taux de consommation totale d'oxygène calculés pour ces différents déchets sont respectivement : 6,9 ; 13,9 ; 22,7 ; 15,1 ; 34,4 et 12,4 mol O₂/kg MS initiale.

La comparaison des résultats obtenus, à savoir : 1,74 mol O₂/kg MS (moyenne calculée sur le mélange M1) et 1,70 mol O₂/kg MS (moyenne calculée sur le mélange M2), à ceux de Druilhe et al. (2007) montre

une différence nette. Cet écart peut être expliqué par la différence entre les matrices étudiées, d'une part, la durée d'essai et les conditions d'aération, d'une autre part

La quantité d'oxygène consommée reste faible par rapport aux taux de consommation transcrits dans la littérature. En effet, la quantité d'oxygène présente au sein du massif dépend du fractionnement biochimique de la matrice de déchets (qualité du substrat vis-à-vis des mécanismes de biodégradation). Plus la matrice est biodégradable, plus ses besoins en oxygène (et donc le renouvellement d'air par aération) sont importants. La dégradation de la matière rapidement biodégradable peut entraîner la consommation totale (ou presque) de l'oxygène introduit par retournement en seulement quelques minutes. Richard et al. (2002) préconisent alors que le taux d'oxygène dans les gros pores du milieu soit compris entre 12 et 14% (idéalement entre 16 et 17%) pour permettre une bonne diffusion dans les grosses particules et les pores remplis d'eau. Toutefois, les résultats acquis sont proches de ceux rapportés dans les travaux de Komilis et al. (2001) qui ont mesuré des taux de respiration qui varient entre 0,67 et 1,90 mol O₂/kg MS initiale, ces valeurs ont été déterminées sur des échantillons de fumier ovin mélangé avec du vieux compost.

Les deux mélanges M1 et M2, ayant des compositions quasi-similaires, avec des proportions différentes, semblent contenir une quantité faible de matière organique facilement biodégradable. Les variations de valeurs indiquent des variations dans les stades d'oxydation et dans la dégradation du carbone dans chaque mélange (Scaglia et al. 2000). De plus, les fumiers bovins et ovins contenus dans les substrats testés ont probablement déjà entamé une phase de fermentation qui a précédé la collecte d'échantillons, tenant compte des conditions de transport des échantillons et surtout d'une période plus au moins longue, avant de commencer les Tests en Belgique. Néanmoins, les déchets verts broyés d'*Acacia cyanophylla*, étant de nature relativement ligneuse, présentent une faible quantité de matière facilement biodégradable. L'oxygène reste le facteur majeur qui peut limiter les tests respirométriques en conditions statiques. En effet, même si l'oxygène est fourni dans la totalité du massif de déchets, il ne peut être disponible pour les microorganismes que si les espaces lacunaires du déchet sont suffisamment grands. Comme dans le cas du processus de compostage, la disponibilité de l'air et la résistance à son passage dans le tas de compost sont intimement liées aux espaces lacunaires, à la porosité et la densité du déchet (Pujol 2012).

3.3. Étude de la stabilité des échantillons de compost

3.3.1. Test ISSEP

Les échantillons de compost C1 et C2 ont été étudiés en duplicatas A et B, en termes de variation de pression, correspondant à une consommation d'oxygène dans des conditions définies.

La figure 5 montre l'évolution de la pression pendant 5 jours d'essai. La pression, exprimée en hectopascal (hPa), augmente durant les deux premières heures, en raison du changement de la température du milieu ambiant (14°C) vers celle du phytotron (22°C), ainsi que la sensibilité des pressocapteurs. Une fois la température équilibrée, on note une chute linéaire progressive de la pression dévoilant que la flore microbienne consommait de l'oxygène. La chute de pression correspondant à la différence entre la pression maximale et la pression minimale a atteint une valeur de 18 hPa pour le compost C1, et 24 hPa pour le compost C2. Bien qu'ayant des allures de chute de pression semblables, les variations de pression obtenues sont faibles par rapport à celles obtenues par Sadaka et al. (2006) qui ont enregistré des chutes de pression de 160 hPa et de 66hPa pour deux composts composés de fumiers de porc.

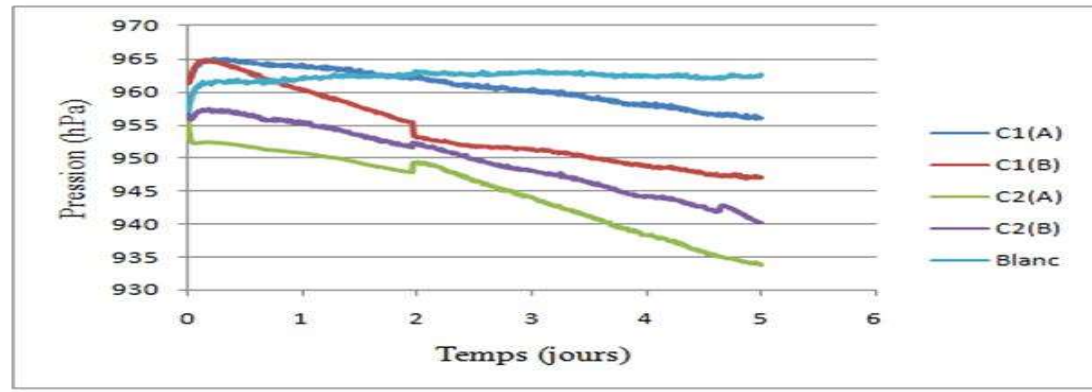


Figure 5.Évolution de la pression pendant 5 jours d’incubation (Méthode ISSEP)

Les taux de consommation de l’oxygène (rO_2) sont calculés selon l’équation 2. Les moyennes de respiration sont de l’ordre de 5,95 et 150,43 mmol d’ O_2 /kg MO/h (Tableau 3) respectivement pour les composts C1 et C2. On note cependant que le taux de respiration rO_2 du compost C1 est inférieur à celui du compost C2 témoignant de sa faible concentration en matière biodégradable, Ceci peut être expliqué par l’effet de l’âge des composts. En effet, le compost C1 âgé de 8 mois présente le taux de respiration le plus faible comparé à celui obtenu pour le compost C2 âgé de 5 mois. Donc, le taux de respiration est étroitement lié à la maturité du compost et à la teneur en matière organique stable, ce qui explique l’utilisation de la Respirométrie pour étudier la stabilité des composts.

$$\text{Équation 2}$$

$$nO_2 = \frac{\frac{(P_{j0} - P_{j5}) * V}{R(273,15 + T)}}{(m_{compost} * \%MO)(N * 24)} * 10^4$$

P_{j0} : pression après correction de l’essai à blanc au temps zéro en hPa, au démarrage de la réaction après la phase latente

P_{j5} : pression après correction de l’essai à blanc après 5 jours d’essai, en hPa

R : constante des gaz parfaits, égale au produit de la constante d’Avogadro et de la constante de Boltzman ($1,602 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1} \times 1,381 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$). Elle vaut 8,314 en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T : température de l’incubateur en °C

V : volume de l’espace de tête en ml

Tableau 3.Taux de respiration des échantillons de compost (Méthode ISSEP)

Compost	rO_2 (mmol O_2 /kg MO/h)	Moyenne
C1 (A)	4,2	5,95
C1 (B)	7,6	
C2 (A)	161,7	150,43
C2 (B)	139,1	

Une proposition provisoire de classification des composts a été formulée par le CWMEA en fonction des taux de respiration pouvant renseigner sur le degré de stabilité des composts. Ainsi, cinq classes de compost sont proposées : très stable, stable, modérément stable, relativement jeune et instable (tableau 4).

Tableau 4.Classification des composts selon le CWMEA

Consommation d’ O_2 (mmol O_2 /kgMO/h)	Type
<5	Très stable, très peu actif
5–10	Stable, activité limitée
10–15	Modérément stable, actif
15–25	Relativement jeune, vraiment très actif
> 25	Jeune, très actif, instable

En se basant sur cette classification, le compost C1 (âgé de 8 mois) ayant un taux de respiration de 5,95 mmol O₂/kgMO/hest considéré stable avec une activité biologique limitée contrairement au compost C2 (âgé de 5 mois) et dont le taux de respiration est de 150,43 mmol O₂/kg MO/h qui est considéré comme encore jeune et instable.

3.3.2. Test AT₄

Le Test respirométrique AT₄ permet de comparer les composts entre eux au regard de l'activité respiratoire. Plusieurs définitions de cet indicateur ont été trouvées dans la littérature. L'indice AT₄ selon Binner et Zach (1989) correspond au cumul de la consommation en oxygène sur 4 jours, mesuré à 20°C via la variation de la concentration en oxygène gazeux dans une enceinte fermée réalimentée en oxygène et contenant 30-40g de matrice organique broyée à moins de 20 mm et d'humidité ajustée à 40-50%. Les études réalisées par Charnay (2005) ont montré que la masse introduite et l'intensité de la consommation en O₂ est variable. Elle augmente entre 10 et 30g, puis diminue fortement pour des masses supérieures. Ce constat est sans doute lié à un effet de masse, dû à l'absence d'agitation des flacons, passant alors en fermentation anaérobie. Ces études ont montré que l'écart est trop important pour des masses supérieures à 30g et que les masses inférieures ou égales à 10g sont peu représentatives de l'échantillon.

Dans le cadre de ce travail, les consommations cumulées d'oxygène pendant 4 jours sont données dans le tableau 5. Elles sont de l'ordre de 50,19 mg O₂/ g MS et 53,95 mg O₂/ g MS en moyenne, respectivement pour le compost C1 et C2. Ces valeurs ne peuvent toutefois indiquer que le compost C1 présente un état de maturité plus avancé que celui du compost C2. Ce suivi de la consommation en O₂ permet normalement de connaître l'état d'avancement dans le traitement, et par voie de conséquence, l'état de maturité du compost. Binner et Zach (1989) ont annoncé que la valeur seuil de l'AT₄ est 10 mg O₂/g MS, tandis que Bidlingmaier et al. (1999) ont rapporté qu'un déchet stable présente un taux de biodégradation inférieur à 20 mg d'O₂/g MS. Ces seuils exprimés en fonction de la matière sèche expriment des vitesses de consommation d'O₂ faibles et des substrats stabilisés. En se basant sur ces seuils de stabilité, on en déduit que les deux échantillons de compost présentent des valeurs nettement supérieures à la limite de stabilité biologique, contrairement à ce qui a été trouvé dans le cas de l'étude de la stabilité des échantillons de compost par la méthode ISSEP. Les résultats obtenus peuvent être comparés à ceux de Druilhe et al. (2007) qui ont trouvé des valeurs de 18,5 mg O₂/g MS pour les marcs de raisin compostés et 82,3 mg O₂/g MS pour les refus de centrifugation de lisiers compostés. Par ailleurs, ces auteurs ont affirmé que la non stabilité des composts ne peut être effectivement validée, vu que les conditions de détermination sont différentes, en termes d'aération, de température et de préparation de l'échantillon. De plus, d'autres facteurs peuvent être à l'origine de ce comportement respiratoire et peuvent affecter la biodégradation des composts, la température en est un. En effet, elle a un grand impact sur la succession des différentes communautés microbiennes qui apparaissent au cours du procédé, ce qui contribue aux différences de comportement rencontrées lors du procédé de compostage, notamment vis-à-vis de propriétés, telles que la consommation d'oxygène.

Tableau 5. Consommation cumulative d'O₂ sur 4 jours (AT₄)

Type	Consom. O ₂ - Indice AT ₄ (mg O ₂ / g MS)	Moyenne (mg O ₂ / g MS)
Compost C1(A)	51,59	50,19
Compost C1(B)	48,78	
Compost C2(A)	60,81	53,95
Compost C2(B)	47,08	

4. Conclusion

L'évaluation de la biodégradabilité, par méthode respirométrique, de deux mélanges de déchets (M1 : 1/2 Broyat *Acacia cyanophylla* + 1/4 Fumier bovin + 1/4 Fumier ovin) et (M2 : 1/3 Broyat *Acacia cyanophylla* + 1/3 Fumier bovin + 1/3 Fumier ovin) a permis de montrer que Le taux de respiration maximale est atteint après seulement quelques heures du début de l'expérimentation. Les moyennes des quantités totales d'oxygène consommé restent faibles par rapport à certaines valeurs rapportées dans la littérature, elles sont de 1,74 et 1,70 mol O₂/kg MS initiale respectivement pour les mélanges M1 et M2. Les deux mélanges M1 et M2, ayant des compositions quasi-similaires, avec des proportions différentes, semblent renfermer une quantité faible de matière organique facilement biodégradable, d'une part, et d'autre part, la quantité d'oxygène maintenue dans les cellules respirométriques pourrait être un facteur limitant, malgré que l'oxygène est fourni en quantité suffisante.

Concernant l'étude de la stabilité des deux composts (C1 et C2) prélevés à deux phases distinctes de maturation (8 et 5 mois), les deux méthodes utilisées (Test ISSEP) et (Test AT4) ont abouti à des constats différents. Selon la méthode ISSEP, les taux de consommation d'oxygène (rO₂) sont de 5,95 et 150,43 (mmol O₂/kg MO/h) respectivement pour les composts C1 et C2. Selon la classification des composts formulée par le CWEA, le compost C1 (âge 8 mois), contrairement au compost C2 (âge 5 mois), qui est considéré comme jeune et instable. Cependant, selon la méthode AT4, les consommations cumulées d'oxygène pendant 4 jours sont de l'ordre de 50,19 et 53,95 mg O₂/ g MS en moyenne, respectivement pour les composts C1 et C2. Ces valeurs ne peuvent toutefois indiquer que le compost C1 présente un état de maturité plus avancé que celui du compost C2, inversement à ce qui a été trouvé dans le cas de l'étude de la stabilité des échantillons de compost par la méthode ISSEP.

Les essais respirométriques constituent un complément important à la caractérisation physico-chimique de la matière organique et la détermination de la stabilité biologique des composts. Cependant, les potentialités d'usage de la respirométrie et les paramètres d'interprétation proposés restent à investiguer.

5. Références

- Adani F, Lozzi P, Genevini PL (2001)** Determination of biological stability by oxygen uptake on municipal solid waste and derived products, *Compost Science and Utilization*, 9 (29): 163-178.
- AFNOR (1987)** Qualité des sols et méthodes d'analyse. 1^{ère} Édition, 133 p.
- Avnimelech Y, Bruner M, Ezrony I, Sela R, Kochba M (1996)** Stability indexes for municipal solid waste compost, *Compost Science and Utilisation*, 4:2, 13-20.
- Berthe L (2007)** Étude et compréhension des processus de biodégradation. Estimation de la biodégradabilité des matrices organiques solides. Doctorat Biosciences de l'environnement, chimie et santé, École doctorale sciences de l'environnement, Université de Provence Aix - Marseille I, France, 263 p.
- Bidlingmaier W, Scheelhaase T, Rechenberger M (1999)** Influence of water and gas permeability on the emission behaviour of pretreated waste. In: *Proceedings Sardinia 1999, Eighth International Waste Management Landfill & Symposium*. S. Margherita di Pula, Cagliari. Italy. 4-8 October 1999: 401-408.
- Binner E, Zach A (1998)** Biological Reactivity of Residual Waste in dependence on the duration of Pretreatment. In *The 3rd Swedish Landfill Symposium*, Lulea, Sweden, 21p.
- Charnay F (2005)** Composting of urban wastes in developing countries: Elaboration of a methodology for a production of compost. Doctorate thesis. Faculty of Sciences and Technology. University of Limoges, Paris, France. 229p.
- Cossu R, Laraia R, Adani F, Raga R (2001)** Test methods for the characterization of biological stability of pretreated municipal solid waste in compliance with EU directives. *Proceedings Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium*, 1– 5 October 2001. CISA, Italy
- De Bertoldi M, Vallini G, Pera A, Zucconi F (1982)** Comparison of three windrow compost systems. *Biocycle*, 23: 45-9.
- Druilhe C, De Guardia A, Berthe L, Tremier A, Martel JL (2007)** Mesure de la biodégradabilité des déchets et des composts par Respirométrie : Applications opérationnelles. *TSM*, N°5: 44-55.
- Ferreira AJD, Lopes MAR, Morais JPF (2006)** Environmental management and audit schemes implementation as an educational tool for sustainability, 104 p.
- Gomez R, Vazquez-lima F, Sanchez-ferrer A (2006)** The use of respiration indices in the composting process: a review, *Waste Manage. Res.*, 24: 37-47.
- Haug R (1995)** *The practical Handbook of compost engineering*, Lewis Publishers (Eds), 717 p.

- Inbar Y, Chen Y, Hadar Y (1989)** Solid-state carbon-13 nuclear magnetic resonance and infrared spectroscopy of composted organic matter, *Soil. Sci. Am. J.*,53: 1695-1701.
- Komilis D, Kontou I, Ntougias S (2011)** A modified static respiration assay and its relationship with an enzymatic test to assess compost stability and maturity. Department of Environmental Engineering, Democritus University of Thrace, Laboratory of Solid and Hazardous Waste, 67-100 Xanthi, Greece.
- Lasaridi KE, Stentiford EDI (1998)** A simple respirometric technique for assessing compost stability, *Water Resources*, 32(12): 3717-3723.
- Lglesias jimenez E, Perez garcia V (1989)** Evaluation of city refuse compost maturity: A review, *Biol. Wastes*, 27: 115-142.
- Malińska K(2016)** Application of a modified OxiTop® respirometer for laboratory composting studies, Czestochowa University of Technology, Poland Faculty of Environmental Engineering and Biotechnology Institute of Environmental Engineering, 62 p.
- Mason IG (2007)** A study of power, kinetics, and modelling in the composting process. Ph.D. thesis, University of Canterbury, England, 436 p.
- Owens JM, Chynoweth DP(1993)** Biochemical Methane Potential of MSW Components, *Wat. Sci.Tech.* 27(2):1-14.
- Pujol A (2012)** Modélisation du procédé de compostage – Impact du phénomène du séchage. Doctorat de l'Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 268 p.
- Richard TL, Hamelers H, Veeken A, Silva T (2002)** Moisture relationships in composting processes, *Compost Science and Utilization*, 10: 286-302.
- Sadaka SS, Richard TL, Loecke T, Liebman M (2006)** Determination of compost respiration rates using pressure sensors, *Compost Science and Utilization*, 14(2): 124-131.
- Saviozzi A, Levi-Minzi R, Riffidi R (1988)** Maturity evaluation of organic wastes, *BioCycle* 29: 54-56.
- Scaglia B, Tambone F, Genevini PL, Adani F (2000)** Respiration index determination: dynamic and static approaches, *Compost Science and Utilization*, 8: 90-99.
- Stegmann R, Heyer KU(2001)** Landfill concept for mechanical- biologically treated residual waste. In: Proceedings of the 8th International Landfill Symposium, SARDINIA 2001 (ed. T.H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann), Vol. 1, pp. 381-388. CISA, Via Marengo 34, 09123 Cagliari, Italy.
- Znaïdi I.(2002)** Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes. Master of science degree mediterranien organic agriculture.