

Université du Québec  
Institut national de la recherche scientifique  
Centre Eau, Terre et Environnement

**Valorisation des rejets organiques de Biscuits Leclerc Ltée.  
par production de compost de haute qualité**

par  
Élaine Boutin  
B. Sc. Biologie

Mémoire présenté  
pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Examineur Externe         | Monsieur Peter Jones<br>Université de Sherbrooke                 |
| Examineur Interne         | Monsieur Ridha Ben Cheikh<br>ENIT, Tunisie                       |
| Directeur de recherche    | Monsieur Guy Mercier<br>INRS-ETE<br>Université du Québec         |
| Co-directeur de recherche | Monsieur Jean-François Blais<br>INRS-ETE<br>Université du Québec |

Août 2009



## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier toute l'équipe d'assainissement de l'INRS pour leur aide fournie tant au niveau intellectuel que manuel. Merci à M. Jean-François Blais, M. Guy Mercier, M. Patrick Drogui et Mme Myriam Chartier.

Je remercie également M. Jacques Leclerc, Dr. Mustapha Lounès, ainsi que tous les employés de Biscuits Leclerc pour leur implication dans le projet.

Je tiens également à remercier Mme. Marianne Goulet sans qui l'aspect *Essais agronomiques* n'aurait pas pu être fait. Merci à l'équipe du Centre de recherche Sémican de Princeville pour l'utilisation de leur matériel et leur aide dans la préparation et l'analyse des grains issus des essais agronomiques.

Merci à Mme. Vanessa Catherine, Mme. Marie-Claude Boivin, M. Jean-Phillipe Pavard et Mme. Halima Saghir les stagiaires avec qui j'ai eu la chance de travailler. Merci aussi à tous mes collègues de laboratoire et aux techniciens de l'INRS Sébastien Duval, Michelle Bordeleau, Anissa Bensadoune et René Rodrigue.

Pour leur appui financier, je tiens à remercier CNRC-PARI, Biscuits Leclerc et BMP Innovation FQRNT-CRSNG.

Je ne pourrais finir sans dire merci à mon conjoint, ma famille et mes amis pour leur support moral et leur bonne humeur. Merci à tous!



## RÉSUMÉ

Les industries de transformation alimentaire génèrent des quantités imposantes de coproduits organiques, lesquelles demeurent, même aujourd'hui, peu valorisées. La présente recherche a permis de réaliser un inventaire détaillé des coproduits générés dans les usines de Biscuits Leclerc qui produisent des biscuits, du chocolat, des céréales et des barres collations. La caractérisation de ces coproduits a permis d'identifier des formulations adéquates de mélanges d'intrants (écailles de cacao, résidus de biscuits et céréales, boues physico-chimiques et biologiques) pour des essais de compostage. Le but était de produire un compost de haute qualité, répondant aux exigences de compost de type AA et ayant de bonnes valeurs fertilisante et marchande. Un dispositif expérimental comprenant six tas de compost d'approximativement une tonne métrique (tm) et aérés par retournement manuel, a ensuite été opéré pendant une période de quatre mois. Des températures maximales se situant entre 60 et 68°C ont été mesurées dans les différents tas au cours de la période de compostage, alors que des températures moyennes supérieures à 50°C ont été maintenues pendant des périodes se situant entre 6 et 10 semaines. Des composts d'excellente qualité, répondant aux exigences de qualité AA (normes du BNQ) en termes de teneurs en contaminants métalliques et microbiens et de stabilité microbiologique ont été générés au terme de la période de compostage. Ces essais ont aussi démontré que les écailles de cacao, un coproduit important de la fabrication du chocolat, constituent un excellent agent de foisonnement.

Des essais de compostage à grande échelle ont été ensuite menés sur des tas d'environ 8 et 14 tm retournés avec une pelle mécanique sur une période de 4 mois. Les différents paramètres suivis lors du compostage sont similaires à ceux des essais à petite échelle. Par contre, étant donné les brassages moins fréquents, un des deux mélanges n'était pas encore totalement dégradé à la fin de l'étude. L'absence de structure bétonnée et d'un système permettant de recueillir le lixiviat ont eu pour conséquences de rendre plus difficile les brassages et d'apporter des quantités significatives de terre aux mélanges.

Des tests agronomiques ont été réalisés avec certains composts issus des premiers essais de compostage. Cette étude agronomique a permis de comparer les effets fertilisants des composts avec ceux d'un compost disponible sur le marché et de différentes doses d'engrais minéraux. Avec l'orge et le lin, un des composts s'est démarqué avec un coefficient d'efficacité supérieur à celui du compost acheté. Par contre, probablement à cause d'une minéralisation tardive, avec l'orge, les autres composts ont eu de très faibles efficacités fertilisantes et des rendements statistiquement équivalents à ne pas ajouter d'engrais minéral.



# TABLE DES MATIÈRES

|   |          |
|---|----------|
| REMERCIEMENTS .....   | III      |
| RÉSUMÉ .....  | V        |
| TABLE DES MATIÈRES .....  | VII      |
| LISTE DES TABLEAUX .....  | XIII     |
| LISTE DES FIGURES.....  | XVII     |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS.....   | XXI      |
| <b>1. INTRODUCTION .....</b>  | <b>1</b> |
| <b>2. REVUE DE LITTÉRATURE.....</b>                                   | <b>5</b> |
| 2.1. GESTION DES RÉSIDUS ORGANIQUES INDUSTRIELS.....                  | 5        |
| 2.1.1. <i>Méthodes de gestion des résidus organiques</i> .....        | 5        |
| 2.1.2. <i>Facteurs limitant le compostage</i> .....                   | 9        |
| 2.1.2.1. Faible coût de l'enfouissement .....                         | 9        |
| 2.1.2.2. Manque de débouchés .....                                    | 9        |
| 2.1.2.3. Réglementation.....  | 10       |
| 2.1.2.4. Éléments défavorables au compostage pour les industries..... | 10       |
| 2.1.3. <i>Pourquoi choisir le compostage?</i> .....                   | 11       |
| 2.2. PROCESSUS DE COMPOSTAGE.....                                     | 12       |
| 2.2.1. <i>Phases du compostage</i> .....                              | 12       |
| 2.2.1.1. Phase de dégradation .....                                   | 12       |
| 2.2.1.2. Phase de maturation.....                                     | 13       |
| 2.2.2. <i>Paramètres du compostage</i> .....                          | 14       |
| 2.2.2.1. Température .....  | 15       |
| 2.2.2.2. Humidité .....   | 17       |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 2.2.2.3.  | Oxygène disponible .....   | 19        |
| 2.2.2.4.  | Ratio C/N .....  | 22        |
| 2.2.2.5.  | pH.....  | 25        |
| 2.2.3.    | <i>Microorganismes impliqués dans le compostage</i> .....                            | 27        |
| 2.3.      | ÉVALUATION FINALE DES COMPOSTS (MATURITÉ, STABILITÉ, QUALITÉ).....                   | 31        |
| 2.3.1.    | <i>Respirométrie</i> .....   | 32        |
| 2.3.2.    | <i>Test d'augmentation de la température</i> .....                                   | 33        |
| 2.3.3.    | <i>Tests agronomiques</i> .....  | 33        |
| 2.3.4.    | <i>Substances humiques</i> .....   | 34        |
| 2.3.5.    | <i>Nitrification</i> .....   | 35        |
| 2.3.6.    | <i>Norme nationale du Canada</i> .....   | 35        |
| 2.4.      | PROCÉDÉS DE COMPOSTAGE .....   | 37        |
| 2.4.1.    | <i>Systèmes ouverts</i> .....  | 37        |
| 2.4.1.1.  | Piles retournées .....   | 39        |
| 2.4.1.2.  | Piles statiques .....  | 41        |
| 2.4.2.    | <i>Systèmes fermés</i> .....   | 43        |
| 2.4.2.1.  | Systèmes fermés à aération passive .....   | 44        |
| 2.4.2.2.  | Systèmes fermés à aération forcée.....   | 47        |
| <b>3.</b> | <b>HYPOTHÈSE DE RECHERCHE, OBJECTIFS SPÉCIFIQUES ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE .....</b> | <b>57</b> |
| 3.1.      | HYPOTHÈSE DE RECHERCHE.....  | 57        |
| 3.2.      | OBJECTIFS SPÉCIFIQUES.....   | 58        |
| 3.3.      | DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE .....   | 58        |
| <b>4.</b> | <b>MÉTHODOLOGIE.....</b>   | <b>59</b> |
| 4.1.      | INVENTAIRE ET CARACTÉRISATION DES INTRANTS.....                                      | 59        |
| 4.2.      | ESSAIS DE COMPOSTAGE EN TAS .....  | 60        |
| 4.2.1.    | <i>Essais à petite échelle</i> .....   | 60        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.2.    | <i>Essais à grande échelle</i> .....                         | 63        |
| 4.3.      | ESSAIS AGRONOMIQUES.....                                     | 65        |
| 4.4.      | MÉTHODES ANALYTIQUES .....                                   | 71        |
| 4.4.1.    | <i>Solides, pH et température</i> .....                      | 71        |
| 4.4.2.    | <i>Éléments nutritifs</i> .....                              | 72        |
| 4.4.3.    | <i>Ratio C/N</i> .....                                       | 72        |
| 4.4.4.    | <i>Métaux</i> .....  | 73        |
| 4.4.5.    | <i>Tests de maturité</i> .....                               | 73        |
| 4.4.6.    | <i>Mesures microbiologiques</i> .....                        | 74        |
| 4.5.      | ANALYSES STATISTIQUES .....                                  | 74        |
| <b>5.</b> | <b>RÉSULTATS ET DISCUSSION</b> .....                         | <b>75</b> |
| 5.1.      | INVENTAIRE DES INTRANTS DE COMPOSTAGE .....                  | 75        |
| 5.2.      | CARACTÉRISATION DES INTRANTS DE COMPOSTAGE .....             | 78        |
| 5.3.      | ESSAI DE COMPOSTAGE À PETITE ÉCHELLE .....                   | 81        |
| 5.3.1.    | <i>Composition initiale des mélanges de compostage</i> ..... | 81        |
| 5.3.2.    | <i>Aspect général des composts</i> .....                     | 84        |
| 5.3.3.    | <i>Perte de masse lors du compostage</i> .....               | 86        |
| 5.3.4.    | <i>Taux d'humidité</i> .....                                 | 88        |
| 5.3.5.    | <i>Évolution de la température</i> .....                     | 90        |
| 5.3.6.    | <i>Évolution du pH des composts</i> .....                    | 91        |
| 5.3.7.    | <i>Carbone, azote et rapport C/N</i> .....                   | 92        |
| 5.3.8.    | <i>Éléments nutritifs et métaux</i> .....                    | 94        |
| 5.3.9.    | <i>Tests de maturité des composts</i> .....                  | 95        |
| 5.3.10.   | <i>Mesures microbiologiques</i> .....                        | 96        |
| 5.4.      | ESSAIS DE COMPOSTAGE À GRANDE ÉCHELLE .....                  | 98        |

|                  |  |            |
|------------------|--|------------|
| 5.4.1.           | <i>Composition initiale et finale des mélanges de compostage</i> .....   | 98         |
| 5.4.2.           | <i>Aspect général des composts</i> .....   | 98         |
| 5.4.3.           | <i>Perte de masse lors du compostage (solides volatils)</i> .....  | 100        |
| 5.4.4.           | <i>Taux d'humidité</i> .....   | 100        |
| 5.4.5.           | <i>Évolution de la température</i> .....   | 103        |
| 5.4.6.           | <i>Évolution du pH des composts</i> .....  | 104        |
| 5.4.7.           | <i>Évolution de la production de CO<sub>2</sub></i> .....  | 105        |
| 5.4.8.           | <i>Carbone, azote et rapport C/N</i> .....   | 107        |
| 5.4.9.           | <i>Éléments nutritifs et métaux</i> .....  | 108        |
| 5.4.10.          | <i>Lixiviat et incorporation de terre lors des brassages</i> .....   | 110        |
| 5.4.11.          | <i>Tests de maturité des composts</i> .....  | 112        |
| 5.4.12.          | <i>Mesures microbiologiques</i> .....  | 113        |
| 5.5.             | ESSAIS AGRONOMIQUES.....   | 114        |
| 5.5.1.           | <i>Essais agronomiques avec l'orge</i> .....   | 114        |
| 5.5.2.           | <i>Essais agronomiques avec le lin</i> .....   | 130        |
| 5.5.3.           | <i>Rendements pour l'ensemble des essais agronomiques</i> .....  | 140        |
| 5.5.4.           | <i>Efficacité fertilisante des composts</i> .....  | 141        |
| <b>6.</b>        | <b>CONCLUSION</b> .....  | <b>147</b> |
| <b>7.</b>        | <b>RECOMMANDATIONS</b> .....   | <b>149</b> |
| <b>8.</b>        | <b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....   | <b>151</b> |
| <b>ANNEXE A.</b> | <b>DISPOSITION DES PARCELLES</b> .....   | <b>159</b> |
| <b>ANNEXE B.</b> | <b>QUANTITÉS DE CHAQUE ENGRAIS MINÉRAL MISES PAR PARCELLE</b> .....  | <b>161</b> |
| <b>ANNEXE C.</b> | <b>CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES COPRODUITS ÉCHANTILLONNÉS AUX<br/>USINES DE BISCUITS LECLERC</b> ..... | <b>163</b> |

|                  |  |            |
|------------------|--|------------|
| <b>ANNEXE D.</b> | <b>PHOTOS RELATIVES AUX ESSAIS AGRONOMIQUES.....</b>                     | <b>169</b> |
| <b>ANNEXE E.</b> | <b>TENEURS EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS ET EN MÉTAUX DU COMPOST ACHETÉ.....</b> | <b>173</b> |
| <b>ANNEXE F.</b> | <b>DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES DE LA VILLE DE TROIS-RIVIÈRES .....</b>       | <b>175</b> |



## LISTE DES TABLEAUX

|            |  |    |
|------------|--|----|
| TABLEAU 1  | TAUX DE RÉCUPÉRATION DES MATIÈRES COMPOSTABLES PAR DIVERS TYPES D'ICI (TIRÉ DE VILLENEUVE <i>ET AL.</i> , 2008) .....                    | 4  |
| TABLEAU 2  | AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES MÉTHODES DE VALORISATION DES RÉSIDUS ORGANIQUES .....   | 6  |
| TABLEAU 3  | AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE MÉTHODES D'ÉLIMINATION DES RÉSIDUS ORGANIQUES.....   | 8  |
| TABLEAU 4  | CARACTÉRISTIQUES DES DEUX PHASES DU COMPOSTAGE (ADAPTÉ DE SCHUCHARDT, 2005).....   | 14 |
| TABLEAU 5  | DESCRIPTION DES PRINCIPAUX MICROORGANISMES IMPLIQUÉS DANS LE COMPOSTAGE .....  | 29 |
| TABLEAU 6  | CARACTÉRISTIQUES COMMUNES AUX TROIS CATÉGORIES DE COMPOST .....  | 36 |
| TABLEAU 7  | CARACTÉRISTIQUES PROPRES À CHACUNE DES CATÉGORIES DE COMPOST.....  | 36 |
| TABLEAU 8  | COMPOSITION DES MÉLANGES D'INTRANTS POUR LES ESSAIS DE COMPOSTAGE À PETITE ÉCHELLE .....   | 62 |
| TABLEAU 9  | COMPOSITION DES MÉLANGES D'INTRANTS POUR LES ESSAIS DE COMPOSTAGE À GRANDE ÉCHELLE .....   | 64 |
| TABLEAU 10 | CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES INITIALES DU SOL .....  | 66 |
| TABLEAU 11 | QUANTITÉ DE COMPOST ÉPANDU (SUR BASE HUMIDE) SUR LES PARCELLES D'ORGE ET DE LIN POUR COMBLER 100% DES BESOINS EN AZOTE DES CULTURES..... | 68 |
| TABLEAU 12 | QUANTITÉ D'ENGRAIS MINÉRAUX ÉPANDUE SUR LES PARCELLES D'ORGE ET DE LIN.....  | 68 |
| TABLEAU 13 | ÉVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE TOTAL ET DU POURCENTAGE DE MATIÈRE SÈCHE PRÉ ET POST-ENTREPOSAGE .....                                    | 69 |
| TABLEAU 14 | PRODUCTION ESTIMÉE DES DIFFÉRENTS INTRANTS POTENTIELS DE COMPOSTAGE DE BISCUITS LECLERC.....   | 76 |
| TABLEAU 15 | PROPORTIONS RELATIVES DES COPRODUITS DE LA FAMILLE BISCUITS .....  | 77 |
| TABLEAU 16 | PROPORTIONS RELATIVES DES COPRODUITS DE LA FAMILLE CÉRÉALES .....  | 77 |
| TABLEAU 17 | CARACTÉRISTIQUES DES COPRODUITS DES DIFFÉRENTES FAMILLES D'INTRANTS UTILISÉS LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE À PETITE ÉCHELLE .....        | 79 |
| TABLEAU 18 | CARACTÉRISTIQUES DES COPRODUITS DES DIFFÉRENTES FAMILLES D'INTRANTS UTILISÉS LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE À GRANDE ÉCHELLE.....         | 82 |
| TABLEAU 19 | CARACTÉRISTIQUES INITIALES DES MÉLANGES UTILISÉS LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE À PETITE ÉCHELLE .....                                    | 83 |
| TABLEAU 20 | ASPECT DES COMPOSTS AU TERME DE LA PÉRIODE DE COMPOSTAGE EN PILES.....   | 85 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| TABLEAU 21 | CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES FINALES DES COMPOSTS.....  | 87  |
| TABLEAU 22 | MESURES DU TAUX D'HUMIDITÉ DES COMPOSTS ET VOLUMES TOTAUX D'EAU AJOUTÉS LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE EN PILES.....   | 89  |
| TABLEAU 23 | TESTS DE MATURITÉ DES COMPOSTS AU TERME DE LA PÉRIODE DE COMPOSTAGE À PETITE ÉCHELLE DE QUATRE MOIS   | 96  |
| TABLEAU 24 | DÉNOMBREMENT DES COLIFORMES FÉCAUX, DES BHAA ET DES SALMONELLES DANS LES COMPOSTS AU TERME DE LA PÉRIODE DE COMPOSTAGE À PETITE ÉCHELLE DE QUATRE MOIS .....  | 97  |
| TABLEAU 25 | CARACTÉRISTIQUES INITIALES ET FINALES DES MÉLANGES UTILISÉS LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE À GRANDE ÉCHELLE .....  | 99  |
| TABLEAU 26 | MESURES DU TAUX D'HUMIDITÉ DES COMPOSTS LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE À GRANDE ÉCHELLE .....  | 101 |
| TABLEAU 27 | FACTEUR DE CONCENTRATION DES TENEURS EN ALUMINIUM, CHROME ET FER FINALES DES COMPOSTS À GRANDE ÉCHELLE PAR RAPPORT À CEUX À PETITE ÉCHELLE .....  | 109 |
| TABLEAU 28 | CARACTÉRISTIQUES DU LIXIVIAT RECUEILLI LE 26 AOÛT À PROXIMITÉ DES PILES DE COMPOST DES ESSAIS À GRANDE ÉCHELLE .....  | 111 |
| TABLEAU 29 | TEST DE MATURITÉ DES COMPOSTS À GRANDE ÉCHELLE AU JOUR 107.....   | 113 |
| TABLEAU 30 | DÉNOMBREMENT DES COLIFORMES FÉCAUX, DES BHAA ET DES SALMONELLES DANS LES COMPOSTS À GRANDE ÉCHELLE AU JOUR 107.....   | 113 |
| TABLEAU 31 | QUANTITÉ D'AZOTE POTENTIELLEMENT DISPONIBLE, PHOSPHORE ASSIMILABLE, POTASSIUM ASSIMILABLE, CALCIUM, MAGNÉSIUM ET SOUFRE TOTAL APPORTÉE PAR PARCELLE SELON LE TYPE D'AMENDMENT UTILISÉ POUR L'ORGE ..... | 117 |
| TABLEAU 32 | TENEURS MINIMALES ET MAXIMALES (MG KG <sup>-1</sup> ) D'ÉLÉMENTS CONTENUS DANS LES GRAINS D'ORGE POUR L'ENSEMBLE DES TYPES D'AMENDEMENTS .....  | 129 |
| TABLEAU 33 | QUANTITÉ D'AZOTE POTENTIELLEMENT DISPONIBLE, PHOSPHORE ASSIMILABLE, POTASSIUM ASSIMILABLE, CALCIUM, MAGNÉSIUM ET SOUFRE TOTAL APPORTÉE PAR PARCELLE SELON LE TYPE D'AMENDMENT UTILISÉ POUR LE LIN ....  | 137 |
| TABLEAU 34 | TENEURS MINIMALES ET MAXIMALES (MG KG <sup>-1</sup> ) D'ÉLÉMENTS CONTENUS DANS LES GRAINES DE LIN POUR L'ENSEMBLE DES TYPES D'AMENDEMENTS .....   | 139 |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| TABLEAU 35 | COEFFICIENT D'EFFICACITÉ FERTILISANTE DES DIVERS COMPOSTS POUR LA CULTURE DE L'ORGE ET DU LIN..... | 142 |
| TABLEAU 36 | DISPOSITION DES PARCELLES POUR L'ORGE.....   | 159 |



## LISTE DES FIGURES

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| FIGURE 1  | PROPORTION DES MATIÈRES ORGANIQUES TRANSFORMÉES EN COMPOST EN 2002 PAR LES MEMBRES DE L'AQIC<br>(TIRÉE D'ENVIRO ACCÈS <i>ET AL.</i> , 2003).....                | 2  |
| FIGURE 2  | QUANTITÉ TOTALE DE MATIÈRE ORGANIQUE TRANSFORMÉE ANNUELLEMENT PAR LES MEMBRES DE L'AQIC ENTRE<br>1992 ET 2002 (TIRÉE D'ENVIRO ACCÈS <i>ET AL.</i> , 2003) ..... | 3  |
| FIGURE 3  | CARACTÉRISTIQUES DES DEUX PHASES DE COMPOSTAGE (TIRÉE DE MUSTIN, 1987) .....  | 13 |
| FIGURE 4  | PARAMÈTRES INFLUENÇANT LE COMPOSTAGE (ADAPTÉE DE SCHUCHARDT, 2005).....   | 15 |
| FIGURE 5  | SUBSTRATS ET PRODUITS DE L'ACTIVITÉ MICROBIENNE DANS DU COMPOST (ADAPTÉE DE SCHUCHARDT, 2005) .....   | 18 |
| FIGURE 6  | COURBE THÉORIQUE DES BESOINS EN OXYGÈNE AU COURS DU COMPOSTAGE (TIRÉE DE MUSTIN, 1987).....   | 23 |
| FIGURE 7  | COURBE THÉORIQUE DE L'ÉVOLUTION DU PH DURANT LE COMPOSTAGE (TIRÉE DE MUSTIN, 1987) .....  | 26 |
| FIGURE 8  | CLASSIFICATION DE DIVERS PROCÉDÉS DE COMPOSTAGE .....   | 38 |
| FIGURE 9  | COMPOSTAGE PAR PILE RETOURNÉE (ADAPTÉE DE SCHUCHARDT, 2005) .....   | 39 |
| FIGURE 10 | RETOURNEUR D'ANDAIN (TIRÉE DE SCHUCHARDT, 2005) .....   | 39 |
| FIGURE 11 | INSTALLATION D'UN LIEU DE COMPOSTAGE EN ANDAIN (TIRÉE DE SCHUCHARDT, 2005).....   | 40 |
| FIGURE 12 | COMPOSTAGE PAR PILES RETOURNÉES COMBINÉES À UNE AÉRATION FORCÉE (ADAPTÉE DE SCHUCHARDT,<br>2005) .....  | 41 |
| FIGURE 13 | INSTALLATION D'UN LIEU DE COMPOSTAGE À PILES AÉRÉES (TIRÉE DE USEPA, 1979) .....  | 42 |
| FIGURE 14 | CONFIGURATION D'UNE PILE AÉRÉE AGRANDIE (TIRÉE DE USEPA, 1979) .....  | 43 |
| FIGURE 15 | HOT BOX (TIRÉE DE ARCHWOOD GREENHOUSES, 2008) .....   | 45 |
| FIGURE 16 | INSTALLATION D'UN TEG SILO-CAGE (TIRÉE DE TEG, 2008) .....  | 46 |
| FIGURE 17 | SYSTÈMES DE VERMITECH (TIRÉE DE VERMITECH, 2008) .....  | 47 |
| FIGURE 18 | BIORÉACTEUR HORIZONTAL STATIQUE (ADAPTÉE DE SCHUCHARDT, 2005 ET DE SHAMMAS ET WANG, 2007) .....   | 49 |
| FIGURE 19 | COMPTRAINER (TIRÉE DE GREEN MOUNTAIN TECHNOLOGIES, 2008) ET DOUBLE-T EQUIPMENT (TIRÉE DE<br>DOUBLE T EQUIPMENT, 2008).....                                      | 49 |
| FIGURE 20 | BIORÉACTEUR VERTICAL (ADAPTÉE DE SCHUCHARDT, 2005 ET DE SHAMMAS ET WANG, 2007).....   | 50 |
| FIGURE 21 | COMPOSTEUR HORIZONTAL AVEC LIT AGITÉ (ADAPTÉ DE SCHUCHARDT, 2005) .....   | 51 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| FIGURE 22 | LE SYSTÈME MARVEL DE GLOBAL EARTH PRODUCTS (TIRÉE DE GLOBAL EARTH PRODUCTS, 2008) .....  | 53  |
| FIGURE 23 | EARTH TUB (TIRÉE DE GREEN MOUNTAIN TECHNOLOGIES, 2008) .....   | 54  |
| FIGURE 24 | BIDON ROTATOIRE (ADAPTÉE DE SCHUCHARDT, 2005) .....  | 55  |
| FIGURE 25 | INSTALLATIONS DES TAS AU DÉMARRAGE DES ESSAIS DE COMPOSTAGE .....  | 63  |
| FIGURE 26 | PILE T2 ET PELLE-MÉCANIQUE UTILISÉE POUR LES ESSAIS À GRANDE ÉCHELLE.....  | 65  |
| FIGURE 27 | ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA TENEUR EN EAU (HUMIDITÉ) DANS LES COMPOSTS LORS DES ESSAIS DE<br>COMPOSTAGE À PETITE ÉCHELLE .....                  | 90  |
| FIGURE 28 | ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPÉRATURE INTERNE ET EXTERNE DES COMPOSTS LORS DES ESSAIS DE<br>COMPOSTAGE À PETITE ÉCHELLE .....                 | 91  |
| FIGURE 29 | ÉVOLUTION TEMPORELLE DU PH DES COMPOSTS LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE À PETITE ÉCHELLE .....   | 92  |
| FIGURE 30 | ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA TENEUR EN SOLIDES VOLATILS LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE À GRANDE<br>ÉCHELLE .....                                  | 101 |
| FIGURE 31 | ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA TENEUR EN EAU (HUMIDITÉ) DANS LES COMPOSTS LORS DES ESSAIS DE<br>COMPOSTAGE À GRANDE ÉCHELLE.....                   | 102 |
| FIGURE 32 | ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPÉRATURE INTERNE ET EXTERNE DES COMPOSTS ET JOURS DE BRASSAGE<br>DES ESSAIS DE COMPOSTAGE À GRANDE ÉCHELLE ..... | 104 |
| FIGURE 33 | ÉVOLUTION TEMPORELLE DU PH DES COMPOSTS LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE À GRANDE ÉCHELLE .....   | 105 |
| FIGURE 34 | ÉVOLUTION TEMPORELLE DE L'ESTIMATION DES ÉMISSIONS DE CO <sub>2</sub> LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE À<br>GRANDE ÉCHELLE .....                  | 106 |
| FIGURE 35 | RENDEMENTS MOYENS SUR UNE BASE SÈCHE DE L'ORGE SELON LE TYPE D'AMENDEMENT UTILISÉ .....  | 114 |
| FIGURE 36 | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS DU TEST <i>LSD</i> EFFECTUÉ SUR LES RENDEMENTS SECS DE L'ORGE.....  | 115 |
| FIGURE 37 | POIDS SECS AUX 1 000 GRAINS MOYENS DE L'ORGE SELON LE TYPE D'AMENDEMENT UTILISÉ .....  | 118 |
| FIGURE 38 | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS DU TEST DE DUNN EFFECTUÉ SUR LE POIDS SEC AUX 1 000 GRAINS DE<br>L'ORGE .....                                     | 119 |
| FIGURE 39 | TENEURS EN PROTÉINE MOYENNES DES GRAINS D'ORGE SELON LE TYPE D'AMENDEMENT UTILISÉ .....  | 120 |
| FIGURE 40 | HAUTEURS MOYENNES DE L'ORGE SELON LE TYPE D'AMENDEMENT UTILISÉ.....  | 121 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| FIGURE 41 | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS DU TEST DE DUNN EFFECTUÉ SUR LES HAUTEURS DE L'ORGE .....  | 122 |
| FIGURE 42 | TENEUR MOYENNE EN MINÉRAUX DES GRAINS D'ORGE SELON LE TYPE D'AMENDEMENT UTILISÉ .....   | 123 |
| FIGURE 43 | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS DU TEST <i>LSD</i> EFFECTUÉ SUR LES TENEURS MOYENNES EN CALCIUM DES<br>GRAINS D'ORGE .....   | 124 |
| FIGURE 44 | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS DU TEST <i>LSD</i> EFFECTUÉ SUR LES TENEURS MOYENNES EN POTASSIUM DES<br>GRAINS D'ORGE .....   | 125 |
| FIGURE 45 | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS DU TEST <i>LSD</i> EFFECTUÉ SUR LES TENEURS MOYENNES EN MAGNÉSIUM DES<br>GRAINS D'ORGE .....   | 126 |
| FIGURE 46 | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS DU TEST <i>LSD</i> EFFECTUÉ SUR LES TENEURS MOYENNES EN PHOSPHORE DES<br>GRAINS D'ORGE .....   | 127 |
| FIGURE 47 | RENDEMENTS MOYENS SUR UNE BASE SÈCHE DU LIN SELON LE TYPE D'AMENDEMENT UTILISÉ .....  | 130 |
| FIGURE 48 | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS DU TEST <i>LSD</i> EFFECTUÉ SUR LES RENDEMENTS DU LIN .....  | 132 |
| FIGURE 49 | POIDS SEC MOYEN AUX 1 000 GRAINS DE LIN SELON LE TYPE D'AMENDEMENT UTILISÉ .....  | 133 |
| FIGURE 50 | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS DU TEST <i>LSD</i> EFFECTUÉ SUR LE POIDS AUX 1 000 GRAINS DE LIN .....   | 133 |
| FIGURE 51 | HAUTEURS MOYENNES DU LIN SELON LE TYPE D'AMENDEMENT UTILISÉ .....   | 134 |
| FIGURE 52 | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS DU TEST <i>LSD</i> EFFECTUÉ SUR LES HAUTEURS DU LIN .....  | 135 |
| FIGURE 53 | TENEUR MOYENNE EN MINÉRAUX DES GRAINES DE LIN SELON LE TYPE D'AMENDEMENT UTILISÉ .....  | 136 |
| FIGURE 54 | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS DU TEST <i>LSD</i> EFFECTUÉ SUR LES TENEURS MOYENNE EN PHOSPHORE DU LIN ...  | 138 |
| FIGURE 55 | RENDEMENT EN GRAINS DE L'ORGE POUR L'ENGRAIS MINÉRAL (EM) ET LES DIVERS COMPOSTS TESTÉS POUR<br>UNE PLAGE DE FERTILISATION DE 0 À 80 KG HA <sup>-1</sup> D'AZOTE DISPONIBLE ..... | 144 |
| FIGURE 56 | RENDEMENT EN GRAINS DU LIN POUR L'ENGRAIS MINÉRAL (EM) ET LES DIVERS COMPOSTS TESTÉS POUR UNE<br>PLAGE DE FERTILISATION DE 0 À 80 KG HA <sup>-1</sup> D'AZOTE DISPONIBLE .....    | 145 |
| FIGURE 57 | ÉCAILLES DE CACAO ENCORE APPARENTE À LA RÉCOLTE .....   | 169 |
| FIGURE 58 | MAUVAISES HERBES DANS LES PARCELLES D'ORGE .....  | 169 |
| FIGURE 59 | APPARENCE DES PARCELLES D'ORGE .....  | 170 |
| FIGURE 60 | APPARENCE DES PARCELLES DE LIN .....  | 170 |

FIGURE 61 SITE DES ESSAIS AGRONOMIQUES (LIN ET ORGE) ..... 171

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

|                     |   |
|---------------------|---|
| % p p <sup>-1</sup> | Pourcentage poids/poids   |
| ANOVA               | Analyse de variance   |
| AQIC                | Association québécoise des industriels du compostage  |
| BHAA                | Bactéries hétérotrophes totales   |
| BNQ                 | Bureau de normalisation du Québec   |
| C/N                 | Rapport carbone/azote   |
| C1                  | Compost aux intrants proportionnels aux sous-produits générés dans les usines, brassage deux fois par semaine et arrosage dès que l'humidité était inférieure à 50%                           |
| C2                  | Compost aux intrants proportionnels aux sous-produits générés dans les usines, brassage et arrosage aux deux semaines   |
| C3                  | Compost sans intrants de la famille Biscuits, brassage deux fois par semaine et arrosage dès que l'humidité était inférieure à 50%  |
| C4                  | Compost sans intrants de la famille Céréales, brassage deux fois par semaine et arrosage dès que l'humidité était inférieure à 50%  |
| C5                  | Compost aux intrants proportionnels aux sous-produits générés dans les usines, brassage une fois par deux semaines et arrosage dès que l'humidité était inférieure à 50%                      |
| C6                  | Compost sans intrants des familles Biscuits et Céréales (uniquement des boues et des écailles de cacao), brassage deux fois par semaine et arrosage dès que l'humidité était inférieure à 50% |
| CA                  | Parcelles enrichies avec du compost de fumier de mouton acheté  |
| CCC                 | Conseil canadien du compostage  |
| CCME                | Conseil canadien des ministres de l'environnement   |
| CCRMP               | Canadian certified reference materials project  |
| CE                  | Coefficient d'efficacité  |
| CEC                 | Capacité d'échange cationique   |
| CET                 | Corps étrangers tranchants  |
| CRAAQ               | Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec   |
| E0                  | Parcelles sans amendement   |
| E100                | Parcelles enrichies avec des engrais minéraux répondant à 100% des besoins en azote de l'espèce   |

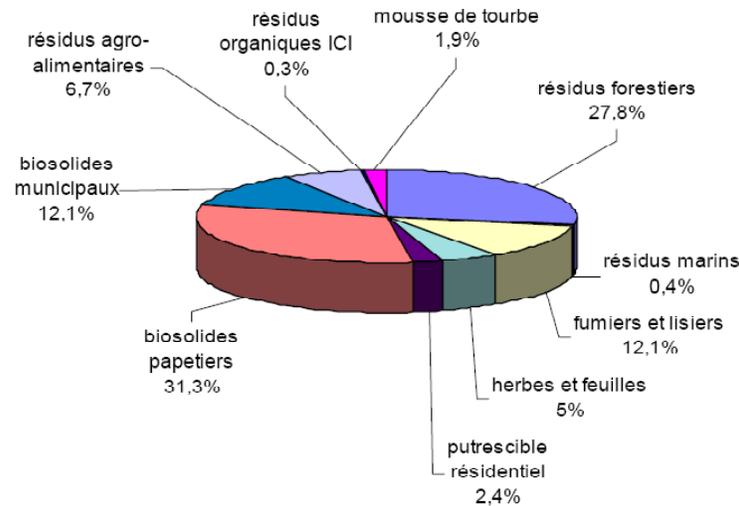
|                |   |
|----------------|---|
| E150           | Parcelles enrichies avec des engrais minéraux répondant à 150% des besoins en azote de l'espèce |
| E25            | Parcelles enrichies avec des engrais minéraux répondant à 25% des besoins en azote de l'espèce  |
| E50            | Parcelles enrichies avec des engrais minéraux répondant à 50% des besoins en azote de l'espèce  |
| EM             | Engrais minéral   |
| EPTC           | Environmental products & technologies corporation   |
| FCQAO          | Federal compost quality assurance organization  |
| Gps            | Gramme en poids sec   |
| ICI            | Industries, commerces et institutions   |
| ICP-AES        | Spectrophotométrie à émission de plasma induit  |
| LMC            | Longwood manufacturing corporation  |
| LSD            | Least significant difference test   |
| MDDEP          | Ministère du Développement durable et Parcs   |
| méq            | milliéquivalent   |
| NPP            | Nombre le plus probable   |
| R <sup>2</sup> | Coefficient de détermination  |
| ST             | Solides totaux  |
| SV             | Solides volatils  |
| T              | Température   |
| tm             | Tonne métrique  |
| tmh            | Tonne métrique humide   |
| tms            | Tonne métrique sèche  |
| T1             | Compost aux intrants proportionnels aux sous-produits générés dans les usines                   |
| T2             | Compost composé uniquement des boues physico-chimiques et biologiques et des écaillés de cacao  |
| UFC            | Unités formatrices de colonies  |

## 1. INTRODUCTION

Avec le développement des villes et surtout depuis l'avènement de l'ère de l'industrialisation, la gestion des déchets est devenue problématique (Moll, 2004). Une des techniques qui peut être utilisée pour gérer les résidus organiques est le compostage. Ce procédé biologique de conversion contrôlée valorise les substrats organiques en un produit stabilisé, hygiénique, semblable à un terreau et riche en composés humiques. Il implique l'oxydation biologique des substances organiques d'origine animale ou végétale en conditions aérobies (Mustin, 1987).

Le processus du compostage est simple, mais les procédés peuvent être complexifiés. C'est dans les années 70 qu'a surtout débuté le développement de nouvelles stratégies et procédés de compostage et que les procédés et technologies qui étaient déjà en place ont été optimisés (Golueke et Diaz, 1996). Malgré tout, encore aujourd'hui, le niveau des technologies utilisées au Québec se situe généralement entre bas et très bas, c'est-à-dire un compostage en andain sur une plateforme bétonnée (Recyc-Québec, 2002; Wilson *et al.*, 2004). En 1990, le Conseil Canadien du Compostage (CCC) fut créé, afin de promouvoir le développement de cette méthode de valorisation (Enviro Accès *et al.*, 2003). Par la suite, le regroupement des huit plus gros producteurs québécois de composts en 1992 forma l'Association Québécoise des Industriels du Compostage (AQIC). Celle-ci a participé à élaborer en 1997 la norme sur la qualité des composts mise à jour en 2005 (CAN/BNQ 0413-200/2005). Son rôle est également de promouvoir une croissance coordonnée de l'industrie québécoise du compostage en protégeant les marchés actuels et futurs (Enviro Accès *et al.*, 2003).

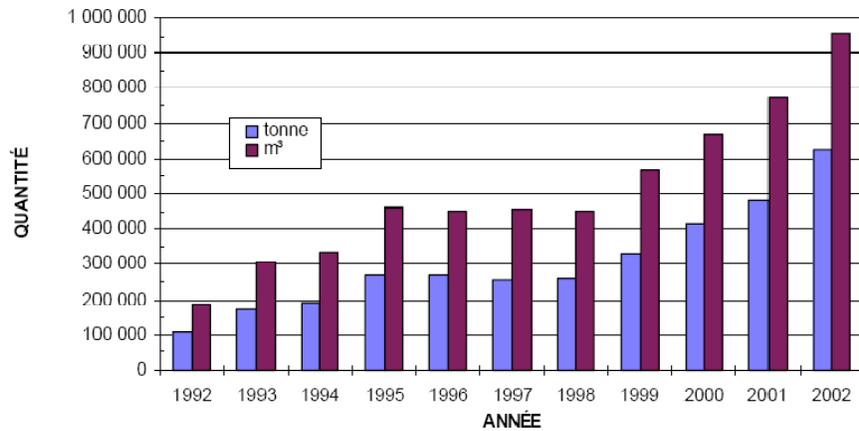
Les matières compostées au Québec sont assez variables. En 2002, l'AQIC a produit 73% des matières compostées, soit 628 448 tm (Forcier et Laquerre, 2004), dont la majorité était des biosolides papetiers et des résidus forestiers (Figure 1) (Enviro Accès *et al.*, 2003).



**Figure 1 Proportion des matières organiques transformées en compost en 2002 par les membres de l'AQIC (tirée d'Enviro Accès *et al.*, 2003)**

Depuis 1992, la quantité de matières organiques valorisées ne cesse d'augmenter (Figure 2) (Enviro Accès *et al.*, 2003). Ceci est probablement dû en partie à la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles (1998-2008) qui préconise de considérer les déchets comme des « *matières résiduelles* » afin d'en faire ressortir leur potentiel (Ministère du Développement durable et Parcs (MDDEP), 1999). Un des objectifs de la Politique est de mettre en valeur 60% des matières putrescibles dans les municipalités et dans les industries, commerces et institutions (ICI). De plus, la Politique prend en considération la valorisation

des boues municipales et industrielles et soutient qu'« éventuellement, aucune boue ne devrait être enfouie sans démonstration qu'il n'est pas économiquement viable de la valoriser » (MDDEP, 1999).



**Figure 2** Quantité totale de matière organique transformée annuellement par les membres de l'AQIC entre 1992 et 2002 (tirée d'Enviro Accès *et al.*, 2003)

La quantité de matière compostée devrait continuer d'augmenter puisqu'un fort pourcentage de matières putrescibles des secteurs municipaux et des ICI n'est toujours pas valorisé (Tableau 1) et que le compostage constitue la forme principale de valorisation des matières putrescibles (Recyc-Québec, 2002).

**Tableau 1 Taux de récupération des matières compostables par divers types d'ICI**  
**(tiré de Villeneuve *et al.*, 2008)**

| Type d'ICI                                     | Taux de récupération (%) |
|--|--------------------------|
| Supermarché                                    | 40 - 45                  |
| Marché entrepôt                                | 20 - 30                  |
| Restaurant familial et restaurant fine cuisine | 30 - 40                  |
| Industrie et institution                       | 10 - 30                  |

Il est à noter que les matières putrescibles des ICI proviennent à plus de 30% des résidus alimentaires issus des secteurs de la transformation, de la distribution et de la consommation alimentaire (Recyc-Québec, 2003). La présente étude porte sur le secteur industriel de la transformation alimentaire. *Plus particulièrement, l'objectif de cette recherche est d'évaluer le potentiel de valorisation des coproduits des usines de Biscuits Leclerc, pour la fabrication de composts de haute qualité, c'est-à-dire rencontrant les exigences de composts de type AA selon la norme nationale du Canada (CAN/BNQ 0413-200/2005).* Cette étude a fait l'objet d'un article accepté dans Journal of Environmental Engineering and Science.

Dans un premier temps, différents moyens de gestion des résidus organiques industriels au Québec sont exposés, puis le processus du compostage est décrit plus en détail. Par la suite, différentes méthodes d'évaluation de la maturité des composts sont expliquées. Subséquemment, une variété de techniques de compostage est présentée. Après cette revue de littérature, les hypothèses, les objectifs spécifiques et la démarche expérimentale de cette recherche sont émis. La méthodologie est présentée, les résultats sont ensuite présentés et discutés, puis les points forts concluent cette étude. Enfin, des recommandations sont émises.

## **2. REVUE DE LITTÉRATURE**

### **2.1. GESTION DES RÉSIDUS ORGANIQUES INDUSTRIELS**

Plusieurs moyens existent pour gérer les résidus organiques. Le compostage est une méthode qui peut être écartée par les industries pour diverses raisons telle que le dégagement de mauvaises odeurs. Toutefois, elle reste une technique qui devrait être prise en compte à cause de divers avantages comme son faible coût.

#### **2.1.1. Méthodes de gestion des résidus organiques**

Les industries peuvent utiliser différentes méthodes pour gérer leurs résidus organiques, soit par valorisation (le compostage, la digestion anaérobie ou d'autres formes de valorisation), soit par l'incinération ou par l'enfouissement. Ces méthodes sont comparées aux Tableaux 2 et 3.

Il a été démontré que plusieurs rejets de l'industrie agroalimentaire pouvaient être compostés: rejet de la production et de transformation de fruits (ex. pelures d'agrumes, résidus de pression de raisins), de légumes (ex. feuilles de betteraves) (Ranalli *et al.*, 2001; Stabnikova *et al.*, 2005; Shammass et Wang, 2007), de thé et café (Tang *et al.*, 2003), de céréales (ex. pailles de riz, de blé, résidus d'orge) (Blanco et Almendros, 1995; Ranalli *et al.*, 2001; Lu *et al.*, 2008), d'olives (Paredes *et al.*, 2002; Ahmad et Bhargava, 2005; Cegarra *et al.*, 2006; Roig *et al.*, 2006; Arvanitoyannis et Kassaveti, 2007; Abid *et al.*, 2007; Sellami *et al.*, 2008), de l'industrie de l'huile de palme (Thambirajah *et al.*, 1995;

**Tableau 2 Avantages et inconvénients des méthodes de valorisation des résidus organiques**

| Type de gestion               | Définition   | Avantages  | Inconvénients   |
|-------------------------------|--|--|---|
| Compostage                    | Conversion en conditions aérobies par oxydation biologique des substrats organiques en un produit stabilisé, hygiénique, semblable à un terreau et riche en composés humiques *        | Solution environnementale intégrée englobant récupération, recyclage et valorisation en vue d'une réintroduction dans le cycle de la matière organique ‡ | Peut être long (9 à 25 semaines en andain)<br><br>Peut produire de mauvaises odeurs si l'aération et l'humidité ne sont pas contrôlés correctement ** |
| Digestion anaérobie           | Conversion de la partie organique des résidus en un biogaz par des bactéries en conditions anaérobies. Le produit final, comme le méthane, est utile pour la production d'énergie **,† | Procédé bien développé<br><br>Produit final stable **  | Nécessite de la chaleur<br><br>Bactéries sensibles aux variations de températures **  |
| Pyrolyse                      | Dégradation de la biomasse par la chaleur en absence d'oxygène qui résulte en la production de produit solide, liquide ou gazeux*†   | Option prometteuse pour la production de combustible (biogaz, huile) et de produits chimiques (adsorbant et fertilisant)*†                               | Risque de conserver des composés toxiques contenus dans les résidus organiques *†   |
| Gazéification                 | Conversion de la matière organique solide en syngaz (gaz synthétique) par une réaction à des températures supérieures à 700 °C en présence d'oxygène **,†                              | Production d'un comburant : le syngaz **,†   | Méthode coûteuse**††  |
| Liquéfaction                  | Bris de la structure polymérique par chauffage en absence d'oxygène produisant un liquide **,††  | Production d'un comburant**††  | Méthode coûteuse**††  |
| Autres formes de valorisation | Réutilisation des résidus organiques pour la production de nourriture animale ‡  | Parmi les méthodes de gestion des résidus organiques solides les moins dispendieuses ‡   | Applicable à une petite fraction de résidus<br><br>Nécessite plusieurs manipulations ‡  |

- \* Mustin (1987)
- \*\* Mulligan (2002)
- † Rulkens (2004)
- ‡ Otten (2001)
- \*† Demirbas (2009)
- \*\*† Roig *et al.* (2006)
- \*†† Trottier *et al.* (2006)
- \*\*†† Elliott *et al.* (1991)

**Tableau 3 Avantages et inconvénients de méthodes d'élimination des résidus organiques**

| Type de gestion | Définition   | Avantages   | Inconvénients  |
|-----------------|--|---|--|
| Incinération    | Destruction par combustion à hautes températures du matériel organique * | Nécessaire pour la matière qui ne peut pas être valorisée ou réduite autrement<br>Permet de gérer de grandes quantités de déchets **  | Émissions de dioxines et d'autres émissions potentiellement cancérigènes *· **<br>Nécessité d'enfouir les cendres *<br>Coûts élevés †  |
| Enfouissement   | Décharge pour le stockage ultime des déchets *                           | Nécessaire pour la matière qui ne peut pas être valorisée ou réduite autrement *<br>Collecte des gaz de décomposition (surtout du méthane) et génération d'électricité possible ‡ | Contamination du lixiviat par les métaux lourds<br>Contribution à l'effet de serre (dégagement de méthane et de gaz carbonique) et aux pluies acides (dégagement de composés organiques volatils, azotés et soufrés) †,‡ |

\* Mulligan (2002)

\*\* Rulkens (2004)

† Recyc-Québec (2002)

‡ Evans (2007)

Stabnikova *et al.*, 2005), d'écaillés d'arachides et de noix (Shammas et Wang, 2007), de produits laitiers (Ranalli *et al.*, 2001; Sung et Ritter, 2008), de poissons (Laos *et al.*, 1998), de crustacés (Tang *et al.*, 2003), de transformation de viandes (Matteson et Sullivan, 2006), de conserveries (Cooperbrand *et al.*, 2003) et de boues de l'industries du sucre (Ahmad et Bhargava, 2005; Seth *et al.*, 2005; Satisha et Devarajan, 2007).

### **2.1.2. Facteurs limitant le compostage**

Plusieurs facteurs limitent toutefois le développement du compostage: le faible coût de l'enfouissement, le manque de débouchés des composts, la lourde réglementation auxquels il faut ajouter les contraintes des industries.

#### ***2.1.2.1. Faible coût de l'enfouissement***

Il est très ardu pour le compostage de faire compétition au faible coût d'enfouissement au Canada (12 à 70 \$  $\text{tm}^{-1}$ ) (Recyc-Québec, 2002). Afin d'être peu coûteuses (25 à 40 \$  $\text{tm}^{-1}$  traitée en milieu ouvert) (Villeneuve *et al.*, 2008), les techniques de compostage utilisées sont restées rudimentaires et souvent moins efficaces (Recyc-Québec, 2002).

#### ***2.1.2.2. Manque de débouchés***

À cause d'un manque d'information, il existe des préjugés défavorables quant à la qualité des composts. Des efforts de communication par une implication accrue des intervenants de l'industrie du compostage et une campagne de sensibilisation pour faire connaître le

produit permettraient d'éliminer ces préjugés. Ainsi, des débouchés en agriculture, en horticulture et en aménagement municipal et public pourraient avoir lieu (Recyc-Québec, 2002).

#### **2.1.2.3. Réglementation**

La réglementation concernant la fabrication de compost et son utilisation peut être assez complexe et peut freiner l'industrie du compostage (Recyc-Québec, 2002). Pour plusieurs utilisations du compost, un certificat d'autorisation émis par le ministère de l'Environnement du Québec en vertu de l'article 22 de la *Loi sur la qualité de l'environnement* est nécessaire et la demande est longue. Par contre, si le compost est utilisé en agriculture, un compost certifié par le Bureau de Normalisation du Québec (BNQ) est suffisant (Recyc-Québec, 2002).

#### **2.1.2.4. Éléments défavorables au compostage pour les industries**

Les industries ont d'autres éléments défavorables à la valorisation de leurs déchets organiques en compost: le manque de connaissance sur le compostage et la réglementation, l'absence fréquente de service de collecte ou de centre de compostage pouvant recueillir les matières, le manque de connaissance par rapport aux types et aux quantités de résidus générés, le manque d'adaptation de l'équipement de récupération, de collecte et de conditionnement, le manque de formation du personnel et d'espace pour collecter les rejets, le peu de mesures incitatives pouvant motiver les entreprises à mieux gérer leurs matières résiduelles (Forcier et Laquerre, 2004; Villeneuve *et al.*, 2008).

### **2.1.3. Pourquoi choisir le compostage?**

L'épandage de compost est avantageux. L'utilisation du compost améliore la fertilisation et enrichi le sol par une amélioration de la nutrition minérale en azote, phosphore, potassium et certains oligoéléments (Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B, Cl) (Shammas et Wang, 2007). L'action fertilisante se manifeste lentement et de façon continue lors de la minéralisation de la matière organique (Garland *et al.*, 1995). Ainsi, les éléments risquent moins d'être perdus par lessivage (Sauvesty et Tabi, 1995). De plus, l'utilisation du compost permet d'obtenir une plus grande diversité de microorganismes pouvant stimuler l'activité biologique (Lee *et al.*, 2004). De plus, certains composts possèdent des propriétés stoppant le développement de champignons pathogènes du sol ou contribuent à lutter contre certains insectes (Hardy et Sivasithamparams, 1991; Hoitink *et al.*, 1991). Pour les agriculteurs, le compost peut faire économiser de l'argent en réduisant l'utilisation de fertilisants et de pesticides (Garland, 1995; Hoog, 2004). Également, grâce au pouvoir tampon de l'humus, les besoins de chaulage des terres diminuent (He *et al.*, 1992; Hoog, 2004). Le compost agit aussi sur la structure du sol. Il augmente la capacité de rétention de l'eau jusqu'à 3-5% et la résistance à la sécheresse des sols sablonneux tout en augmentant la porosité, les échanges gazeux et le drainage des sols argileux (Hoog, 2004). De même, l'utilisation du compost diminue l'érosion éolienne et hydrique du sol (Garland *et al.*, 1995; Hoog, 2004).

## **2.2. PROCESSUS DE COMPOSTAGE**

Le compostage se déroule en deux phases principales et divers paramètres comme la température, le ratio C/N et le pH évoluent tout au long de la décomposition de la matière organique par les microorganismes.

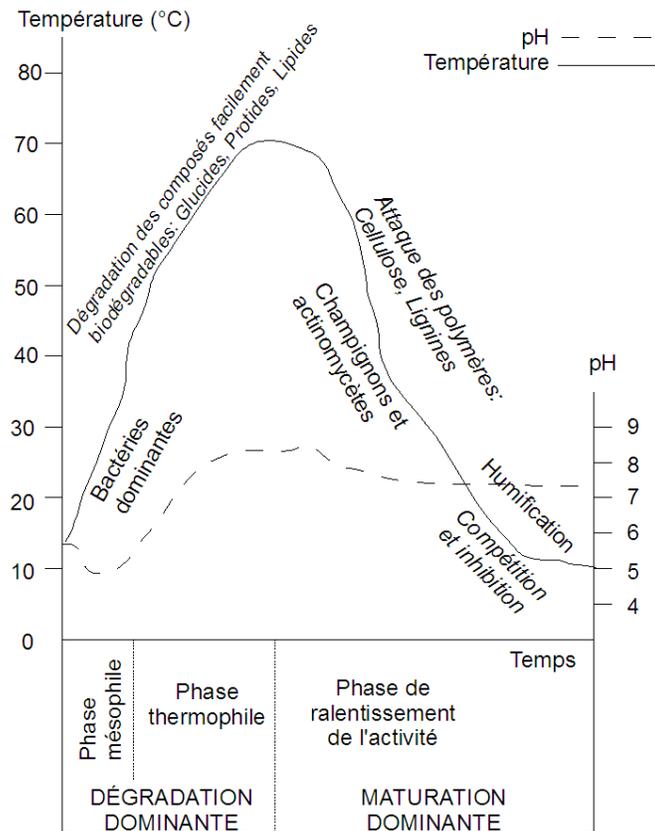
### **2.2.1. Phases du compostage**

Tout le processus de compostage peut être divisé en deux phases ayant des caractéristiques particulières. Il s'agit des phases thermophiles et de maturation.

#### **2.2.1.1. Phase de dégradation**

La première phase du compostage, la phase de dégradation (aussi nommée phase de décomposition, phase thermophile ou phase active), est caractérisée par la dégradation de la plupart du matériel biodégradable (Schuchardt, 2005). Les composés facilement biodégradables (glucides, protéines et lipides) sont consommés par les bactéries et les actinomycètes qui sont dominants (Mustin, 1987; Marshall *et al.*, 2004; Nakasaki *et al.*, 2005) (Figure 3). À mesure que le compost évolue, les conditions environnementales changent favorisant les microorganismes tolérant des conditions extrêmes et permettant la dégradation des sources de carbone plus complexes (Lyon *et al.*, 2000). Cette grande activité microbienne permet l'élévation du compost à des températures allant jusqu'à 75°C (Mustin, 1987; Marshall *et al.*, 2004). Ceci implique également un fort potentiel de perte d'ammoniac (Cantin, 1998). La phase thermophile a habituellement lieu dans des réacteurs

ou dans un endroit couvert et le compost est fréquemment brassé ou aéré, afin de favoriser la biodégradation par voie aérobie (Schuchardt, 2005).



**Figure 3** Caractéristiques des deux phases de compostage (tirée de Mustin, 1987)

### 2.2.1.2. Phase de maturation

La seconde phase, la phase de maturation (aussi nommée phase de séchage et phase d'humification) est caractérisée par une diminution de l'activité et de la biomasse microbienne, par une baisse de production de chaleur et par de hautes concentrations en

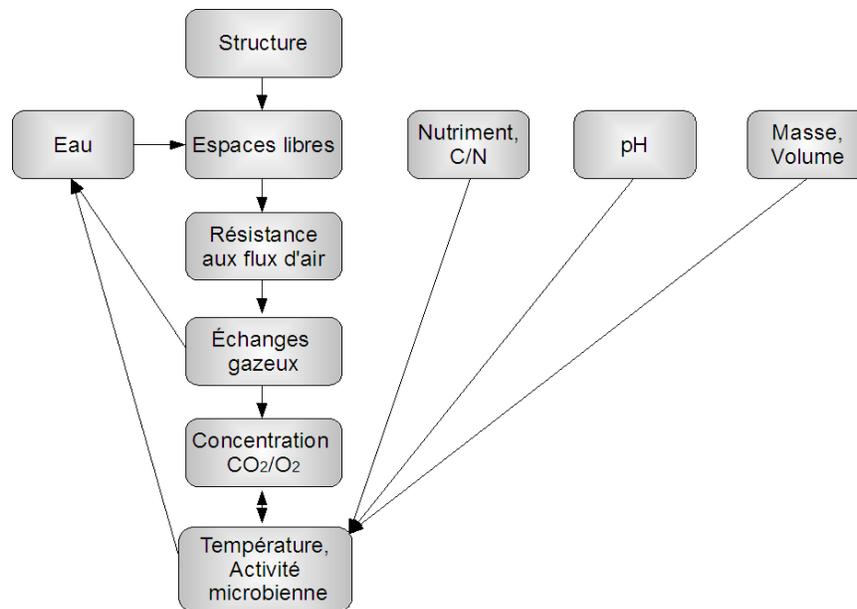
oxygène. Ceci est dû à la réduction de la quantité de substrats disponibles pour les microorganismes (Marshall *et al.*, 2004). De plus, la matière organique encore présente est convertie en substances humiques (acides humiques et fulviques) (Wu *et al.*, 2000). Les champignons et les actinomycètes pouvant dégrader la cellulose et la lignine dominent cette phase qui a habituellement lieu en andains (Mustin, 1987; Schuchardt, 2005). D'autres caractéristiques des deux phases du compostage sont présentées au Tableau 4.

**Tableau 4 Caractéristiques des deux phases du compostage (adapté de Schuchardt, 2005)**

| <b>Phase thermophile</b>  | <b>Phase de maturation</b>  |
|---|---|
| Décomposition des composés facilement biodégradables (sucre, amidon, pectine, protéine) | Décomposition des composés difficilement biodégradables (hémicellulose, graisse, huile, cellulose, lignine, cire) |
| Inactivation des microorganismes pathogènes et des graines                              | Composition de l'humus  |
| Émission d'odeur et drainage  | Faible émission d'odeur   |

### **2.2.2. Paramètres du compostage**

Les paramètres du compostage les plus importants sont ceux en interrelation avec les microorganismes donc la température, le taux d'humidité, la concentration en oxygène, le ratio C/N et le pH (Figure 4). Chacun de ces éléments est décrit dans cette section.



**Figure 4 Paramètres influençant le compostage (adaptée de Schuchardt, 2005)**

### **2.2.2.1. Température**

La température est un élément qui varie beaucoup au cours du compostage. Ses fluctuations sont dues à la production de chaleur par les microorganismes qui oxydent la matière organique (Mustin, 1987). Plus précisément, l'augmentation de la température est une mesure indirecte du taux de croissance microbien, de la production enzymatique et du taux de réaction des enzymes produites par les microorganismes (Richard, 2004). Le réchauffement du compost a notamment pour effet de diminuer à des niveaux acceptables la quantité de bactéries pathogènes, de graines de mauvaises herbes, de nématodes, de protozoaires, d'helminthes et d'autres organismes indésirables lorsque la température atteint 55°C et plus pendant au moins 15 jours (Schaub et Leonard, 1996; USEPA, 1999; Conseil canadien des ministres de l'environnement(CCME), 2005).

Évidemment, la diversité microbienne présente dans le compost évolue en fonction de la température (Golueke, 1991a). Deux groupes peuvent être formés selon leur tolérance: les microorganismes mésophiles, dont la température optimale de croissance est de 20 à 45°C et les microorganismes thermophiles vivant à des températures minimales de 40°C (Mustin, 1987; Santé Canada, 2008). Stentiford (1996) résume l'effet de la température sur les microorganismes en affirmant que des températures supérieures à 55°C maximisent l'hygiénisation, de 45-55°C, le taux de dégradation est maximisé et de 35 à 40°C, la diversité biologique est optimisée. Bien entendu, pour les procédés ayant lieu en système ouvert, les basses températures extérieures peuvent ralentir le compostage seulement si les rejets gèlent (Mustin, 1987).

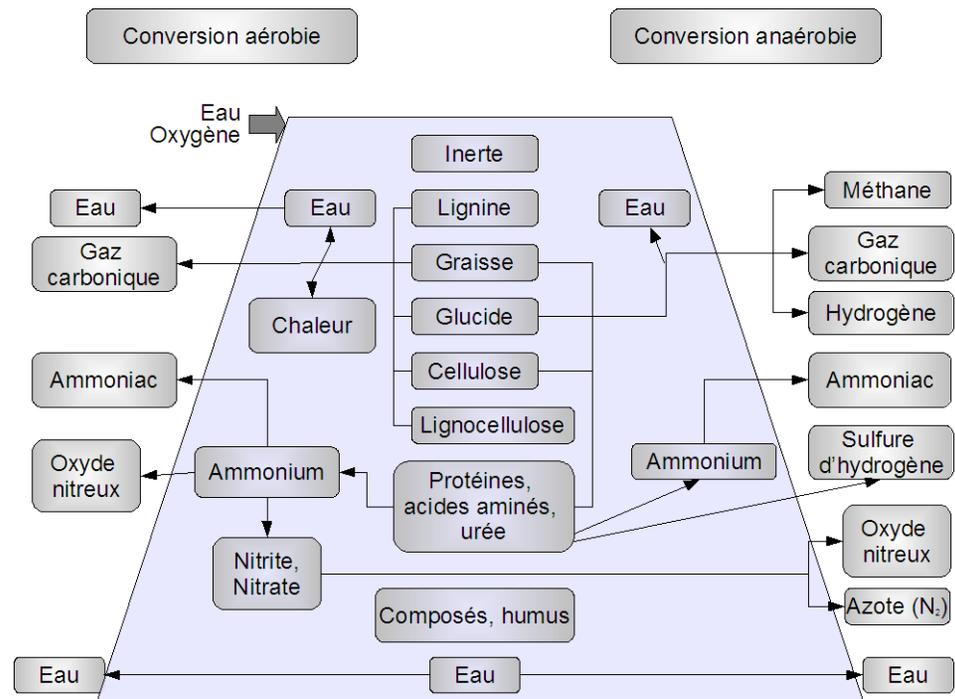
La température varie non seulement en fonction de l'activité microbienne, mais aussi en fonction de la nature de la matière en décomposition. En effet, plus la matière est facilement décomposable (ex. sucres simples), plus la température s'élève et plus le temps de décomposition est court (Mustin, 1987; Sauvesty et Tabi, 1995). La fermentescibilité, soit l'aptitude à fermenter, est un autre élément à considérer. Elle détermine la vitesse de dégradation du substrat et donc le flux calorique émis par unité de temps et unité de masse. Par exemple, les matières riches en graisse et en huile dégagent plus de chaleur par unité de masse que les autres composés organiques. Bref, l'augmentation de la température dépend de la fermentescibilité et du pouvoir calorifique des composés (Mustin, 1987).

Tout ce dégagement de chaleur augmente le taux d'évaporation et accroît le taux de matière sèche, ce qui diminue le volume et le tonnage du compost (Mustin, 1987; Sauvesty et Tabi, 1995). Effectivement, le volume des matériaux peut être réduit de 25 à 50% (Mustin, 1987;

Schaub et Leonard, 1996). Plus la matière est fermentescible, plus les pertes sont grandes (Mustin, 1987). L'évaporation et les produits de la dégradation comme le CO<sub>2</sub>, l'ammoniac et l'acide nitreux expliquent les pertes de masse (Figure 5).

#### **2.2.2.2. Humidité**

Comme les microorganismes sont constitués en majorité d'eau, cet élément est majeur dans l'analyse du compostage. La teneur en eau est un facteur limitant quand elle devient inférieure à des valeurs allant de 30 à 50% selon les auteurs (Mustin, 1987; Golueke, 1991a; Stentiford, 1996; Shammas et Wang, 2007) et l'activité microbienne cesse lorsqu'elle atteint 10% (Golueke, 1991b). L'optimum d'humidité se situe à environ 50% (Nakasaki *et al.*, 1994; Stentiford, 1996; Shammas, 2007). Toutefois, ce n'est pas la quantité totale d'eau qui est importante, mais sa disponibilité pour les microorganismes (l'eau sous forme gazeuse dans les espaces lacunaires) (Mustin, 1987). Le taux d'humidité affecte la vitesse de décomposition. En effet, un manque d'eau inhibe l'activité des microorganismes, alors qu'un excès offre moins d'espaces lacunaires ce qui rend le milieu asphyxiant (Mustin, 1987; Golueke, 1991b; Sauvesty et Tabi, 1995). Afin que le taux d'humidité ne soit pas limitant, il est recommandé d'ajouter de l'eau lors des brassages (Walker *et al.*, 1999; Sundberg et Jonsson, 2005).



**Figure 5** Substrats et produits de l'activité microbienne dans du compost (adaptée de Schuchardt, 2005)

L'humidité relative est liée à la composition biochimique et à la modalité de rétention de l'eau de l'intrant. Ainsi, la teneur optimale en eau est plus élevée si la composition en matériaux de structure (lignocellulosique) est forte (Mustin, 1987). À l'opposé, les composantes, déjà riches en eau, ont besoin de peu d'ajout d'eau tout comme les intrants qui ont tendance à se colmater comme le papier (Golueke, 1991a). La porosité du compost, soit sa capacité à maintenir des interstices, est donc importante.

La teneur en eau évolue au cours du processus de compostage. Au début, elle augmente, car de l'eau est produite suite à la dégradation de la matière organique. Par exemple, la dégradation du glucose forme six molécules d'eau. Par la suite, la teneur en eau diminue sous l'action de la montée de température et de l'aération forcée ou des retournements qui permettent les pertes de vapeur d'eau (Mustin, 1987).

### **2.2.2.3. Oxygène disponible**

La teneur en eau et l'oxygène disponible sont deux éléments étroitement liés dans le compostage. En effet, plus le taux d'humidité est élevé, moins d'interstices aérés sont présents et inversement (Golueke, 1991b). Un niveau d'oxygène optimal variant entre 5 et 16% doit être maintenu selon Chang *et al.* (2005) et Shammas et Wang (2007) pour permettre aux bactéries aérobies d'oxyder les composés organiques dont elles se nourrissent (Mustin, 1987). Le taux d'oxygène lacunaire, soit le pourcentage d'oxygène dans les interstices du compost, dépend du taux d'humidité, mais aussi de la granulométrie et de la forme des particules (Mustin, 1987). Une petite granulométrie augmente la surface de contact avec les microorganismes, mais une granulométrie trop fine a pour effet de

diminuer la porosité et l'aération (Mulligan, 2002). Pour cette raison, des particules de 1.0 à 7.5 cm de grosseur sont recommandées (Mulligan, 2002). Ceci correspond, pour la plupart des matériaux dans les premières phases du compostage, à la situation optimale de 30 à 36% d'espaces lacunaires dans la masse sèche du mélange (Mustin, 1987).

La présence d'odeurs peut indiquer un trop grand taux d'humidité ou des lacunes en oxygène disponible (Mulligan, 2002). L'intensité de l'odeur est d'ailleurs un indicateur du niveau d'anaérobie. L'odeur provient des acides gras, des composés azotés ou soufrés, des cétones, des aldéhydes et des composés aromatiques (Gélinas *et al.*, 2004; Shammass, 2007). Un manque d'aération augmente aussi la teneur en ammoniacque et diminue la formation d'acides volatils (Mulligan 2002). Toutefois, cet état est réversible. Les odeurs disparaissent avec une circulation de l'air accrue ou par des retournements plus fréquents (Golueke, 1991a). La situation opposée est également observable si l'aération est excessive. Dans ce cas, elle empêche l'augmentation de la température, ce qui inhibe l'activité microbienne, donnant ainsi la fausse impression de stabilité du compost (Golueke, 1991b). En ce sens, plus la température du compost augmente, plus la consommation d'oxygène est forte. Celle-ci est un indicateur et une mesure de l'activité biologique puisque la consommation d'oxygène change en fonction des populations microbiennes et de la disponibilité des nutriments (Golueke, 1991a). De façon générale, elle varie de 1 à 4 grammes d'oxygène par gramme de matière organique oxydée (Mustin, 1987).

Le brassage du compost revêt une grande importance puisqu'il permet de réduire l'importance des zones anaérobies dans le compost (Golueke, 1991a; Walker *et al.*, 1999). Il permet d'exposer une plus grande surface de matériel à décomposer à l'air, d'abaisser le

niveau d'humidité, de maintenir une bonne porosité au mélange, de faire une redistribution des microorganismes, d'homogénéiser le compost et d'obtenir un compost stable plus rapidement (Walker *et al.*, 1999; Cegarra *et al.*, 2006; Matteson et Sullivan, 2006). Toutefois, ce ne sont pas tous les procédés de compostage qui incluent un brassage durant le processus. Dans ces cas, l'ajout d'un agent de foisonnement est d'autant plus important et une aération par un plancher perforé ou des tuyaux d'aération au bas de la pile peuvent être effectués (Schuchardt, 2005).

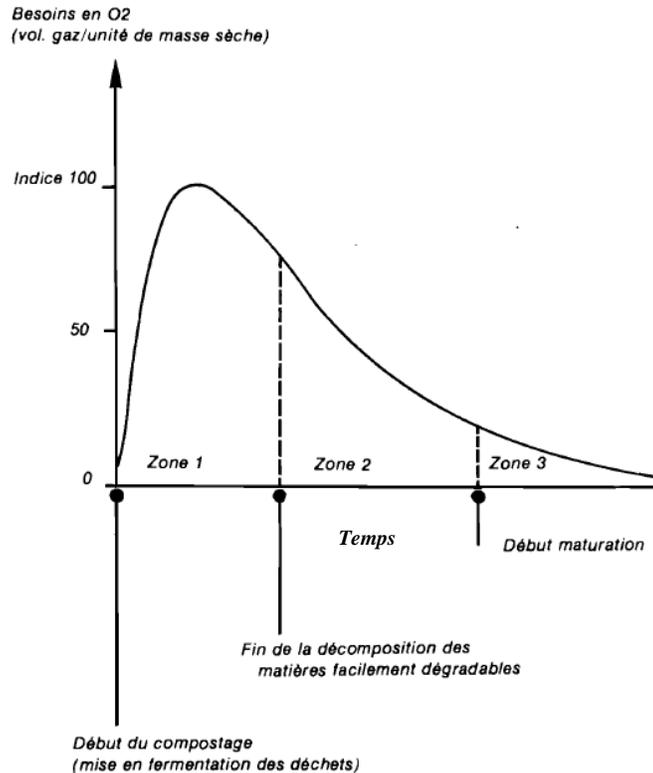
Un agent de foisonnement (aussi appelé agent structurant) est un matériel solide, sec, généralement organique, de faible densité, résistant à la compression et non toxique qui, mélangé aux rejets, augmente la porosité du mélange et favorise une meilleure aération (Mustin, 1987; Burelle *et al.*, 2008). Il permet aussi d'ajuster le taux d'humidité et le rapport C/N (Burelle *et al.*, 2008). Les agents de foisonnement ont un ratio C/N supérieur à 70 et sont généralement des résidus ligneux comme des feuilles, des copeaux de bois ou des branches (Mustin, 1987; Shammass, 2007; Burelle *et al.*, 2008). Idéalement, l'agent doit être très facilement disponible, être situé à proximité du lieu de compostage et peu coûteux (Mustin, 1987; Schaub et Leonard, 1996).

Tout le compost n'est pas en condition aérobie en permanence. Comme le transport de l'oxygène dans les particules hétérogènes en compostage est limité, des zones anaérobies existent à l'échelle microscopique même si le mélange est bien aéré (Hamelers, 1993). Pour cette raison, le compostage peut donc être décrit comme un co-processus aérobie/anaérobie (Reinhardt, 2002). Tout comme les autres paramètres à analyser lors du compostage, le taux d'oxygène évolue au cours du processus, car les besoins en oxygène des

microorganismes dépendent de la composition de la matière organique en termes de fraction biodégradable. Alors, le taux d'aération doit être adapté au cours du processus (Mustin, 1987; de Guardia *et al.*, 2008). Comme le montre la courbe théorique des besoins en oxygène (Figure 6), les besoins en oxygène sont d'abord élevés ( $0.5$  à  $1 \text{ m}^3 \text{ d'air min}^{-1} \text{ tms}^{-1}$  en aération forcée) puisque l'activité microbienne est maximale lors de la dégradation des matières facilement décomposables. Au fur et à mesure que le niveau de difficulté de dégradation augmente, les besoins en oxygène diminuent, dus à une activité microbienne réduite ( $0.1$  à  $0.5 \text{ m}^3 \text{ d'air min}^{-1} \text{ tms}^{-1}$  en aération forcée). Finalement, durant la phase de maturation, la consommation résiduelle est faible et la dégradation aérobie très faible (inférieure à  $0.1 \text{ m}^3 \text{ d'air min}^{-1} \text{ tms}^{-1}$  en aération forcée) (Mustin, 1987).

#### **2.2.2.4. Ratio C/N**

L'analyse du ratio C/N est primordiale lors du compostage, puisque le carbone constitue une source d'énergie stimulant l'activité biologique et que l'azote favorise la croissance microbienne (Sauvesty et Tabi, 1995). L'azote est un composé crucial des protéines et des acides nucléiques qui constituent, bien souvent, plus de 50% de la biomasse des microorganismes (Richard, 2004). Les matières riches en azote sont les fanes de légumes, les légumineuses, et les sous-produits animaux (rapport C/N bas), alors que les matières riches en carbone (rapport C/N élevé) sont notamment la paille, le papier, le bois, etc. (Mustin, 1987). Ce qui est communément nommé « *résidus verts* » contient plus d'azote et les « *résidus bruns* » plus de carbone (Schaub et Leonard, 1996).



**Figure 6 Courbe théorique des besoins en oxygène au cours du compostage (tirée de Mustin, 1987)**

Le ratio C/N idéal au début du compostage varie entre 20/1 et 35/1 (Golueke, 1991b; Mulligan, 2002; Shammas et Wang, 2007). Le ratio idéal est dans la tranche supérieure de l'écart mentionné (25/1 à 35/1) si le substrat est difficile à cataboliser (lignine, composé aromatique, certaines forme de cellulose) (Golueke, 1991b).

Lorsque le carbone est en excès et peu accessible (rapport C/N entre 150/1 et 500/1), comme dans le cas des résidus riches en lignine, en composés aromatiques et en certaines formes de cellulose (exemple: sciure de bois), l'azote est limitant et la vitesse de dégradation est régulée par cet élément (Mustin, 1987; Golueke, 1991b). Alors, la

décomposition est lente et le compostage difficile à contrôler et plus coûteux (Sauvesty et Tabi, 1995). De plus, si un compost mature ayant un rapport C/N trop élevé est épandu, le carbone disponible est utilisé par les cellules microbiennes en retirant du sol l'azote qu'il contient. Ceci va à l'encontre de l'objectif désiré c'est-à-dire de fertiliser les sols (Faugeron, 1992).

À l'opposé, sous les ratios optimaux, la vitesse de compostage est contrôlée par la teneur en carbone disponible (Mustin, 1987). Ces composts se décomposent plus rapidement et l'activité est plus forte dans la phase thermophile (Marshall *et al.*, 2004). Toutefois, les pertes d'azote en excès peuvent se faire par lixiviation de nitrate ou par volatilisation de l'ammoniac (Mustin, 1987; Golueke, 1991a; He *et al.*, 1992; Sauvesty et Tabi, 1995; Richard, 2004). De plus, suite à la création d'un milieu anaérobie, il peut y avoir des problèmes d'odeurs provoqués par les  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  et  $\text{N}_2$  qui sont des gaz à effet de serre (Richard, 2004). Des niveaux trop élevés d'ammonium peuvent être toxiques pour les microorganismes et certains autres rejets peuvent être toxiques pour les plantes (Golueke, 1991a; Mulligan, 2002). Aussi, à cause des niveaux d'oxygènes lacunaires, le pH peut augmenter à des niveaux inhibiteurs de l'activité microbienne (Golueke, 1991a; Sauvesty et Tabi, 1995).

Au cours du compostage, le rapport C/N décroît et se stabilise entre 8/1 et 15/1 dans un compost mur selon Mustin (1987), Sauvesty et Tabi (1995), Bernal *et al.* (1998) et entre 14/1 et 24/1 selon Benito *et al.* (2006). Ceci est dû aux microorganismes qui consomment 15 à 30 fois plus de carbone que d'azote (Mustin, 1987). Le carbone est utilisé comme source d'énergie et une partie est libérée sous forme de gaz carbonique (Mustin, 1987).

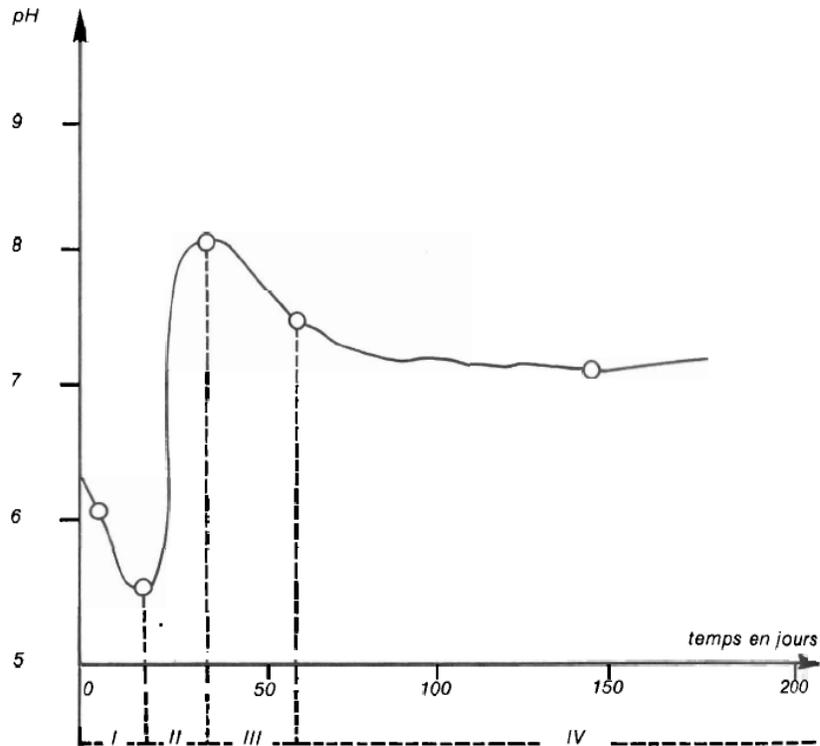
L'azote est quant à lui, perdu sous forme de composés volatils comme l'ammoniac (Mustin, 1987; Golueke, 1991a).

Le dosage du rapport C/N est la méthode la plus adéquate pour décrire l'évolution du compost, mais elle ne permet pas d'évaluer le seuil de maturité (Mustin, 1987; Bernal, Paredes *et al.*, 1998). Toutefois, Hue et Liu (1995) suggèrent d'utiliser le rapport carbone organique soluble dans l'eau/azote organique total comme paramètres d'évaluation de la maturité des composts et propose des valeurs inférieures à 0.7 comme index de la stabilité des composts.

#### **2.2.2.5. pH**

Le pH a un rôle important dans la mobilité et la disponibilité des métaux et des éléments nutritifs (Sauvesty et Tabi, 1995). Celui-ci a également un effet significatif sur les microorganismes qui peuvent tout de même contrôler leur pH interne (Mustin, 1987). Un pH neutre (entre 6 et 8) est optimal pour la plupart des microorganismes (Nakasaki *et al.*, 1993; Sauvesty et Tabi, 1995). Le taux de dégradation diminue quand le pH est au-dessus de 9.0 et en dessous de 5.0 (Nakasaki *et al.*, 1993; Richard, 2004). Il pourrait être tentant de vouloir réguler le pH, mais cela est difficile et il n'a pas été démontré que c'était profitable (Shammas et Wang, 2007).

Évidemment, le pH initial du compost est fonction des intrants utilisés. À partir des intrants dont le pH est variable, le niveau d'acidité évolue. Comme le montre la Figure 7, quatre phases sont observables.



**Figure 7 Courbe théorique de l'évolution du pH durant le compostage (tirée de Mustin, 1987)**

Dans la première, la phase acidogénèse, le pH diminue lorsque débute la phase thermophile (température supérieure à 45°C) à cause de la production de CO<sub>2</sub> et d'acides organiques formés par les microorganismes. Une partie du CO<sub>2</sub> produit lors de l'oxydation de la matière organique se dissout dans l'eau et forme de l'acide carbonique (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O → HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + H<sup>+</sup>) (Mustin, 1987). Alors, le pH peut descendre jusqu'à 4.5 - 5.0 selon les résidus utilisés (Golueke, 1991a). La chute initiale du pH est particulièrement remarquable pour les composts légèrement tamponnés ou ayant des coproduits hautement dégradables (Richard, 2004). Si la baisse de pH est trop grande, le taux de dégradation peut être réduit et les conditions thermophiles retardées (Richard, 2004). Les acides synthétisés permettent la

prolifération d'organismes, généralement acidogènes, capables d'utiliser l'acide comme substrat. Ceci explique l'augmentation du pH à la seconde phase (Golueke, 1991a). Lors de la deuxième phase, celle d'alcalinisation, le pH s'élève jusqu'à 8.0 - 9.0 (Golueke, 1991a). Ceci est provoqué par la dégradation des amines présentes dans les protéines et les bases azotées produisant de l'ammoniaque ( $R-NH_2 \rightarrow NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$ ) et de la libération des bases (Mustin, 1987; Sellami *et al.*, 2008). Lors de la troisième phase, la phase de stabilisation du pH, une diminution du rapport C/N se produit et les réactions s'effectuent plus lentement. De l'ammoniac se perd par volatilisation surtout lorsque le pH est supérieur à 8 et l'azote est utilisé par les microorganismes pour la biosynthèse des matières humiques. Cette phase marque la fin de la dégradation intense. La quatrième phase, la phase stable, est nommée ainsi à cause des réactions lentes de maturation, du pouvoir tampon de l'humus et du pH près de la neutralité qui la caractérisent. En fait, il s'agit de la maturation du compost (Mustin, 1987).

### **2.2.3. Microorganismes impliqués dans le compostage**

Les bactéries, les champignons, les actinomycètes, les algues, les protozoaires et les cyanophycées sont les microorganismes responsables de l'oxydation des résidus organiques. Plus précisément, ce sont les bactéries, les actinomycètes et les champignons qui sont impliqués à 95% dans le processus de compostage (Mustin, 1987). C'est pourquoi ils seront traités davantage au Tableau 5.

Certains arthropodes (acariens, diptères, larves de colléoptères, etc.), myriapodes, nématodes, annélides, enchytréides et lombrics (*Eisenia fetida*, *E. Eiseni*, *E. submontana*,

*Lumbricus castaneus*, *L. herculeus*) jouent également un rôle dans la décomposition. Toutefois, à l'exception des vers, les invertébrés ne sont pas impliqués dans la décomposition de la phase thermophile (Mustin, 1987; Schuchardt, 2005).

Lors du compostage, une attention particulière doit être prise en ce qui a trait aux bioaérosols définis comme étant des bactéries, virus, allergènes de haut poids moléculaire, endotoxines bactériennes, mycotoxines, peptidoglycanes, B(1-3)-glucans, pollen, fibres de plante, etc. vivantes ou mortes, pathogènes ou non-pathogènes dispersés dans l'air (Douwes *et al.*, 2003). Lorsque les bioaérosols sont respirés, ils peuvent causer un risque pour la santé (maladies infectieuses ou respiratoires et cancers) (Douwes *et al.*, 2003; Shammas et Wang, 2007). Les travailleurs des centres de compostage sont exposés à de très grands niveaux de microorganismes (van Tongeren *et al.*, 1997; Douwes *et al.*, 2000) et plusieurs études ont indiqué la haute prévalence de symptômes respiratoires et d'inflammation des voies respiratoires dans cette industrie. (Sigsgaard *et al.*, 1994; Poulsen *et al.*, 1995; Thorn *et al.*, 1998; Douwes *et al.*, 2000; Wouters *et al.*, 2002). Le port d'un masque, l'installation de filtres ou de l'air conditionnée sur la machinerie lourde, la ventilation et l'installation de biofiltre aux lieux de compostage sont des moyens pouvant prévenir ces maladies (Shammas, 2007).

**Tableau 5 Description des principaux microorganismes impliqués dans le compostage**

|  | <b>Champignons</b>  | <b>Bactéries</b>  | <b>Actinomycètes</b>  |
|--|---|---|---|
| <b>Description</b>                                   | Eucaryotes multicellulaires, aérobies (les levures peuvent être anaérobies) et chimiohétérotrophes <sup>1</sup><br>Le plus important groupe de décomposeurs dans les composts <sup>2</sup>  | Procaryotes unicellulaires <sup>1</sup><br>Responsables des premiers bris dans la matière organique et de la majorité de la chaleur produite lors du compostage <sup>5</sup>  | Bactéries hétérotrophes ayant un arrangement multicellulaire de forme filamenteuse ressemblant à un champignon <sup>2-6</sup><br>L'odeur des composts matures est principalement due à ces microorganismes <sup>2</sup>   |
| <b>Substances dégradées</b>                          | Enzymes spécifiques dégradant des composés azotés tels que la cellulose, la lignine et l'hémicellulose <sup>2-3</sup>   | Protéines, lipides, graisses <sup>2</sup>   | Substances non dégradées par les bactéries et les champignons (ex. chitine) <sup>2</sup><br>Décomposition de la cellulose et certaines espèces peuvent dégrader la lignine, le tannin et le caoutchouc <sup>6</sup>   |
| <b>Habitat</b>                                       | Observables à l'œil nu en fin de processus<br>Concentrés surtout dans les 10 à 15 cm du dessus de la pile de compost<br>Limités par les températures supérieures à 55-60°C et le manque d'oxygène plus en profondeur <sup>5</sup><br>pH optimal moyen variant de 5.5 à 8 et tolérant un pH de 2 à 9 <sup>2</sup>  | pH optimal moyen entre 6.0 et 7.5<br>Forte croissance si le rapport C/N est bas et si le niveau d'humidité est élevé <sup>2</sup><br>Température optimale varie selon les espèces de bactéries <sup>4</sup><br>Endospores très résistantes à la chaleur <sup>9</sup>                  | Détectables visuellement dans les 10 à 15 cm du dessus de la pile quand le compost est avancé (couleur allant du bleu-gris au vert mousse et forme poudreuse ou filamenteuse)<br>Limités par des températures supérieures à environ 60°C ou plus et par le manque d'oxygène <sup>4</sup><br>Tolèrent un pH plus élevé que les champignons <sup>6</sup><br>Survivent sous forme de spore <sup>10</sup> |
| <b>Espèces et genres répertoriés dans le compost</b> | Moisissures ( <i>Mucor</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Penicilium</i> , <i>Aspergillus</i> )<br>Levures ( <i>Neurospora</i> , <i>Candida</i> , <i>Lipomyces</i> ) <sup>1-2</sup><br>Autres champignons ( <i>Humicola lanuginosa</i> , <i>Chaetomium thermophile</i> , <i>Talaromyces dupontii</i> , <i>Mycogone nigra</i> , <i>Botryosporium</i> sp.) <sup>4</sup> | Bactéries mésophiles ( <i>Escherichia</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Aeromonas</i> , <i>Alcaligenes</i> , <i>Enterococcus</i> et <i>Bacillus</i> ) <sup>2-8</sup><br>Bactéries thermophiles ( <i>Bacillus subtilis</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>B. circulans</i> ) <sup>2-8</sup> | Les genres thermophiles <i>Streptomyces</i> et <i>Nocardia</i> représentent 90% de la biomasse de ce groupe <sup>2</sup><br><i>Micromonospora</i> , <i>Actinomyces</i> , <i>Nocardiopsis</i> et <i>Nocardioides</i> <sup>2-4</sup><br>Autres actinomycètes thermophiles ( <i>Thermoactinomyces</i> , <i>Micromonospora</i> , <i>Thermospora</i> et <i>Thermopolyspora</i> ) <sup>2-7</sup>            |

- 1 Mulligan (2002)
- 2 Mustin (1987)
- 3 Maheshwari *et al.* (2000)
- 4 Golueke (1991a)
- 5 Finstein et Morris (1975)
- 6 Tuomela *et al.* (2000)
- 7 Schmidt et Walter (1978); Tsuchii *et al.* (1985); Abdulla et El-Shatoury (2007)
- 8 Strom (1985)
- 9 Piggot et Coote (1976)
- 10 Lacey et Crook (1988)

### 2.3. ÉVALUATION FINALE DES COMPOSTS (MATURITÉ, STABILITÉ, QUALITÉ)

À la fin du processus de décomposition, la maturité et la stabilité des composts doivent être évalués. La maturité concerne le degré de décomposition des matières organiques phytotoxiques durant la phase de maturation. Il réfère donc à la phytotoxicité et à la croissance végétale. La stabilité, quant à elle, est relative au degré de décomposition de la matière organique durant la phase thermophile et réfère à l'activité microbienne (Bernal *et al.*, 1998; Wu *et al.*, 2000). Ces deux éléments sont souvent liés entre eux puisque les composés phytotoxiques sont produits par les microorganismes présents dans un compost instable. Toutefois, un compost stable peut avoir besoin de plus de temps pour dégrader les substances phytotoxiques et un compost mature peut avoir un taux de respiration relativement élevé. Pour cette raison, il importe de mesurer la stabilité et la maturité des composts (Wu *et al.*, 2000).

Cette étape est primordiale puisque l'application d'un compost immature et instable inhibe la germination, diminue la croissance des plantes, augmente les risques de déficit en azote, diminue le taux d'oxygène à proximité du système racinaire et peut être phytotoxique notamment à cause de l'émission d'ammoniaque et d'acides organiques (acide acétique, acide propionique et acide *n*-butyrique) (Tang et Waiss, 1978; Golueke, 1991a; Wu *et al.*, 2000; Cooperband *et al.*, 2003).

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la maturité et la stabilité d'un compost. Ces méthodes peuvent être basées sur des caractéristiques physiques (température, demande d'aération, odeur, couleur, densité optique d'extraits d'eau, etc.), chimiques (solides volatils, rapport C/N, demande chimique en oxygène, polysaccharides, substances humiques, etc.) et biologiques des composts (consommation d'O<sub>2</sub>, production de CO<sub>2</sub> et de chaleur, activité enzymatique, contenu en ATP, taux de germination ou croissance des plantes, décompte de la

biomasse microbienne, calorimétrie, etc.) (Bernal *et al.* 1998; Lasaridi et Stentiford, 1998; Ouatmane *et al.*, 2000; de Oliveira *et al.*, 2002). Toutefois, ce ne sont pas toutes ces méthodes qui sont acceptées universellement (Lasaridi et Stentiford, 1998). Ainsi, seulement quelques méthodes seront abordées dans la présente section.

De plus, il est important d'assurer une qualité minimale au compost produit et de catégoriser en terme de qualité les composts afin d'orienter l'utilisation qui en sera faite par la suite. La Norme Nationale du Canada CAN/BNQ 0413-200/2005) remplit cette fonction et les critères à rencontrer sont décrits dans la section 2.3.7.

### **2.3.1. Respirométrie**

La dégradation de la matière organique est directement reliée à la respiration microbienne (Paredes *et al.*, 2002). Depuis longtemps, l'évolution de la production du CO<sub>2</sub> est corrélée avec le niveau de stabilité du compost (Nakasaka *et al.*, 1993; Wong et Fang, 2000; Körner *et al.*, 2003; Kulcu et Yaldiz, 2004; Kwon et Lee, 2004). Il en va de même pour la demande en oxygène (Iannotti *et al.*, 1994; Gomez *et al.*, 2006). Un compost immature a une forte demande en oxygène et une forte production de CO<sub>2</sub>. Pour cette raison, ces deux éléments sont des indicateurs de la stabilité des composts (FCQAO, 1994).

La demande en O<sub>2</sub> et la production de CO<sub>2</sub> sont les méthodes les plus acceptées de détermination de l'activité biologique du compost (Iannotti *et al.*, 1994; Gea *et al.*, 2004). Selon Adani *et al.* (2002) les méthodes basées sur la consommation d'oxygène seraient meilleures que celles basées sur la production de CO<sub>2</sub>, car elles sont directement reliées à l'oxydation de la matière organique. Peu importe les caractéristiques initiales des intrants et les conditions de compostage, le taux de

respiration décroît tout au long du compostage et il se stabilise environ aux mêmes valeurs (Benito *et al.*, 2003; Cooperband *et al.*, 2003).

### **2.3.2. Test d'augmentation de la température**

Le test d'augmentation de la température est une technique simple qui mesure l'augmentation de la température due à l'activité biologique et chimique d'un échantillon de compost (Gomez, 2006). Dans l'étude de Lu *et al.* (2008), le taux de production de CO<sub>2</sub> est directement proportionnel à la température. Ainsi, cette méthode est efficace et largement utilisée en Europe et en Amérique du Nord (ADAS, 2003). Elle est plus simple et moins coûteuse que le test de consommation d'oxygène, mais elle est influencée par la porosité et la teneur en eau du mélange (Gomez, 2006). Butlera *et al.* (2001) indiquent que le test d'augmentation de la température est plus approprié pour déterminer la stabilité du matériel que les tests respirométriques.

### **2.3.3. Tests agronomiques**

Les tests agronomiques permettent d'évaluer si un compost est immature et phytotoxique et qualifient ces propriétés fertilisantes (Mustin, 1987). La présence de toxines dans certains composts peut être une conséquence de conditions anaérobies. Toutefois, normalement, les acides organiques volatils sont produits davantage dans les premières semaines de compostage et leur présence diminue progressivement au cours du processus (Ranalli *et al.*, 2001).

Les tests agronomiques comprennent, entre autres, des tests de germination et de croissance des plantes (ex. longueur des racines). L'index de germination est l'une des méthodes les plus

sensibles pour évaluer la toxicité et le niveau de maturité des composts et un index de germination de 50% est considéré être un bon indicateur d'absence de phytotoxines (Zucconi *et al.*, 1981).

Les tests agronomiques permettent de comparer l'efficacité de différents amendements entre eux. Ils complètent donc les analyses permettant d'évaluer le contenu en carbone, azote, soufre et autres éléments nutritifs (P, Ca, Mg, Na, K).

#### **2.3.4. Substances humiques**

La détermination de la teneur en substances humiques est une technique généralement acceptée comme critère de maturité puisque ces substances évoluent durant le processus (Bernal *et al.*, 1998). Une relation inverse unie donc l'acide fulvique et l'acide humique, l'humification augmentant durant le processus de compostage (Tuomela *et al.*, 2000). Selon Adani *et al.* (1997), la synthèse d'acide humique commence quand le processus de dégradation est terminé, soit dans la seconde phase du compostage. L'utilisation des substances humiques dans la détermination de la maturité a toutefois le désavantage de ne pas avoir de valeur applicable à l'ensemble des composts à cause des origines différentes des résidus pouvant être compostés (Bernal *et al.*, 1998).

Les substances humiques et le degré d'humification de la matière organique peuvent être déterminés grâce au ratio d'humification, à l'index d'humification, au pourcentage d'acide humique, au ratio de l'acide humique sur l'acide fulvique et à la caractérisation chimique, physico-chimique (capacité d'échange cationique) et spectroscopique des substances humiques (Harada et Inoko, 1980; Bernal *et al.*, 1998).

### **2.3.5. Nitrification**

Un des aspects de la maturité des composts est la concentration en azote ammoniacal. À la fin du processus de compostage, le ratio C/N est faible et le compost peut contenir des concentrations phytotoxiques d'azote ammoniacal (Mustin, 1987). Durant la phase de maturation, les nitrates-N s'accumulent et sont le résultat de la nitrification. Une diminution de la concentration en azote ammoniacal et une augmentation de la concentration en nitrates-N sont des indices de maturité (Cáceres *et al.*, 2006). C'est une des raisons pour laquelle le U.S. Composting Council a adopté l'ensemble Solvita® comme méthode pour déterminer ces propriétés (Changal *et al.*, 2003).

### **2.3.6. Norme nationale du Canada**

La norme nationale du Canada concernant les amendements organiques - compost (CAN/BNQ 0413-200/2005) et préparée par le BNQ permet d'assurer une qualité générale au compost (Tableau 6) et de classer en trois catégories de qualité les composts (*AA*, *A* et *B*). Ces catégories classent les composts selon leur teneur en matière organique totale, en corps étrangers et en éléments traces (Tableau 7) (BNQ, 2005). La mesure de ce dernier élément revêt une grande importance puisque l'accumulation de métaux dans l'environnement peut devenir toxique pour la faune et la flore dans le cas où les concentrations deviendraient trop élevées (Burelle *et al.*, 2008). La norme mentionne aussi les méthodes d'échantillonnage et d'analyse devant être utilisées pour évaluer les caractéristiques du compost.

**Tableau 6 Caractéristiques communes aux trois catégories de compost**

|   |   |
|---|---|
| Teneur en eau   | Maximum de 65% de la masse  |
| Teneur en coliformes fécaux   | < 1000 NPP g <sup>-1</sup> sur une base sèche                                     |
| Teneur en salmonelles   | < 3 NPP 4 g <sup>-1</sup> sur une base sèche                                      |
| <b>Critères de maturité et stabilité</b>                            |   |
| Taux de respiration <u>ou</u>                                       | ≤ 400 mg d'O <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> de solides volatils h <sup>-1</sup>    |
| Taux d'évolution du CO <sub>2</sub> <u>ou</u>                       | ≤ 4 mg de CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> de matière organique jour <sup>-1</sup> |
| Augmentation de la température au-dessus de la température ambiante | < 8°C   |

**Tableau 7 Caractéristiques propres à chacune des catégories de compost**

|   | <b>AA</b> | <b>A</b> | <b>B</b>   |
|---|-----------|----------|--|
| Teneur en matières organiques totales<br>(% de la masse sur une base sèche) | 50%       | 30%      | 30%  |
| Dimension maximale des corps étrangers tranchant<br>(CET)<br>(mm)           | 3         | 3        | En sac: 3<br>En vrac: 12.5 (max de 3<br>CET 500 mL <sup>-1</sup> ) |
| Teneur en corps étrangers<br>(% de la masse sur une base sèche)             | ≤ 0.01    | ≤ 0.5    | ≤ 1.5  |
| <b>Teneur max en élément traces (mg kg<sup>-1</sup> de masse sèche)</b>     |           |          |  |
| Arsenic (As)  | 13.0      |          | 75   |
| Cadmium (Cd)  | 3.0       |          | 20   |
| Cobalt (Co)   | 34.0      |          | 150  |
| Chrome (Cr)   | 210       |          | -  |
| Cuivre (Cu)   | 400       |          | -  |
| Mercuré (Hg)  | 0.80      |          | 5  |
| Molybdène (Mo)  | 5.0       |          | 20   |
| Nickel (Ni)   | 62        |          | 180  |
| Plomb (Pb)  | 150       |          | 500  |
| Sélénium (Se)   | 2.0       |          | 14   |
| Zinc (Zn)   | 700       |          | 1850   |

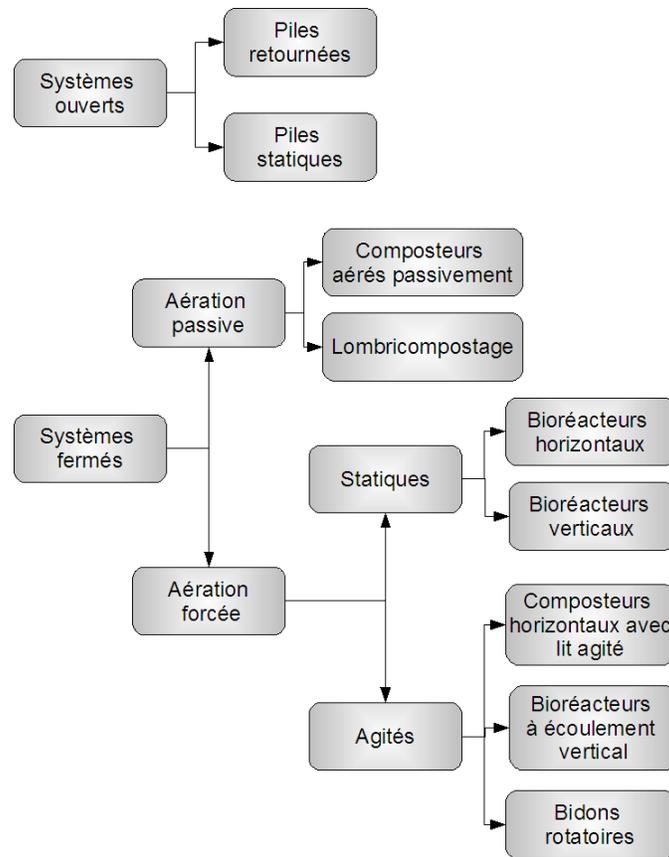
## **2.4. PROCÉDÉS DE COMPOSTAGE**

Peu importe le procédé, les étapes de compostage sont généralement semblables avec un tri ou une séparation des matières pour débiter (Mustin, 1987). Évidemment, un tri à la source est plus facile et économique, mais un tri comprenant, par exemple, une extraction de certains objets par tamis rotatif et une séparation magnétique pour enlever la ferraille peut tout de même devoir être fait. Afin d'obtenir une meilleure granulométrie, une étape de broyage peut être effectuée par la suite. Pour les composts en tas ou en bioréacteur statique, une homogénéisation préalable est nécessaire avant la fermentation. Puis, après maturation, dans l'aire du même nom, une étape de criblage permet de récupérer l'agent de foisonnement, d'enlever les résidus non décomposables si cela n'avait pas été fait au départ et d'améliorer l'aspect visuel du compost. Enfin, le compost peut être stocké à l'abri dans l'air d'entreposage de compost qui est aéré et qui permet d'assécher à 40-50% d'humidité le produit pour en réduire son poids en vu de son transport (Mustin, 1987).

Divers procédés de compostage peuvent être utilisés et ils peuvent être classés selon s'ils se déroulent dans un système ouvert ou fermé, s'ils sont statiques ou agités, aérés de manière forcée ou naturelle et s'ils sont verticaux ou horizontaux (Figure 8).

### **2.4.1. Systèmes ouverts**

Comme leur nom l'indique, les procédés de compostage en système ouvert se déroulent à l'extérieur. Ainsi, plusieurs paramètres peuvent être moins bien contrôlés comme l'apport d'eau par la pluie, la température ambiante, le taux d'humidité dans l'air et le vent (Schuchardt, 2005). De plus, le lixiviat du compost doit être collecté après avoir été drainé dans des fossés d'irrigation. Pour permettre cette collecte du lixiviat et faciliter le prélèvement par la machinerie



**Figure 8 Classification de divers procédés de compostage**

lourde, le compost doit être placé sur une surface dure (gravier, asphalte, béton), de préférence pavée (Mulligan, 2002; Wilson *et al.*, 2004).

Deux procédés de compostage font partie des systèmes ouverts:

- Les piles retournées;
- Les piles statiques.

### 2.4.1.1. Piles retournées

Les piles retournées représentent le procédé le plus vieux de compostage. Il s'agit de faire une pile, aussi appelé andain, triangulaire ou de forme tétrapézoïdale d'environ 1 à 2 m de hauteur (Figure 9) et de les retourner avec des machines spécialisées nommées retourneur d'andain (Figure 10) ou des tracteurs (Shammas et Wang, 2007).

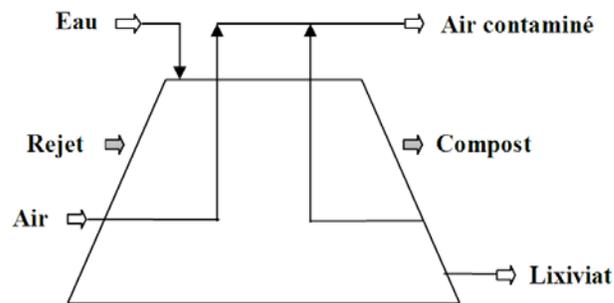


Figure 9 Compostage par pile retournée (adaptée de Schuchardt, 2005)

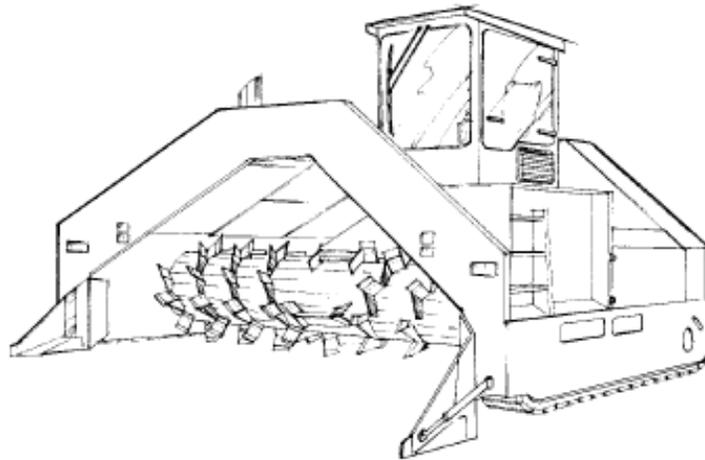
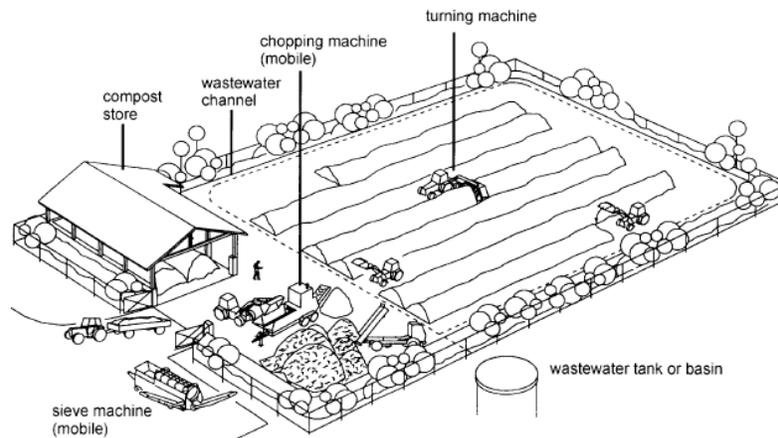


Figure 10 Retourneur d'andain (tirée de Schuchardt, 2005)

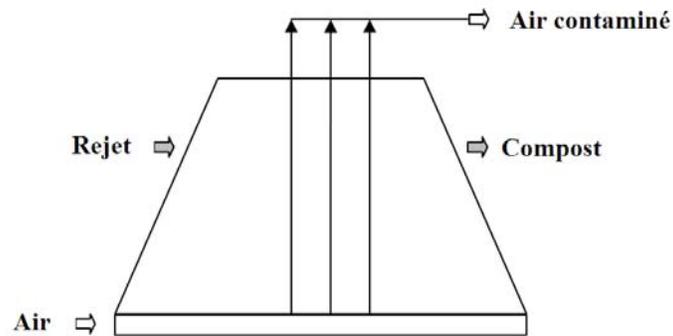
Pour éviter la formation excessive de lixiviat lors des fortes pluies, une toile ou un toit peuvent être mis en place (Shammas et Wang, 2007). Un type d'installations utilisé pour ce type de procédé est illustré à la Figure 11.



**Figure 11** Installation d'un lieu de compostage en andain (tirée de Schuchardt, 2005)

L'utilisation du procédé de piles retournées a pour avantages de nécessiter moins d'agents de foisonnement, d'accélérer la fermentation si les retournements sont fréquents, d'abaisser le taux d'humidité des tas suite à l'intense évaporation lors des retournements, d'homogénéiser le mélange et ainsi d'avoir une probabilité supérieure d'hygiénisation. Par contre, cette technique demande plus d'espace, consomme plus d'énergie à cause de la machinerie utilisée pour retourner les tas et l'oxygène peut être un facteur limitant (Mustin, 1987). Ainsi, les coûts d'opération sont parmi les plus élevés (215 à 245 \$  $\text{tm}^{-1}$ ) (capital de 50 K à 8 M de dollars) (Mulligan, 2002).

L'efficacité de cette technique est très variable et le procédé demeure lent (6 mois) (Mulligan, 2002). Elle dépend de la fréquence des retournements et de la grosseur des piles qui, elles, influencent la quantité d'oxygène disponible pour les microorganismes, les émissions d'odeur, la température du compost et le taux d'humidité. L'augmentation du nombre de retournement a pour désavantage d'émettre plus de bruits par la machinerie et d'augmenter les besoins en espace. Une aération forcée peut également être combinée aux retournements pour améliorer le taux d'aération. Dans ce cas-là, la hauteur des piles peut être de 5 m (Figure 12) (Mulligan, 2002).

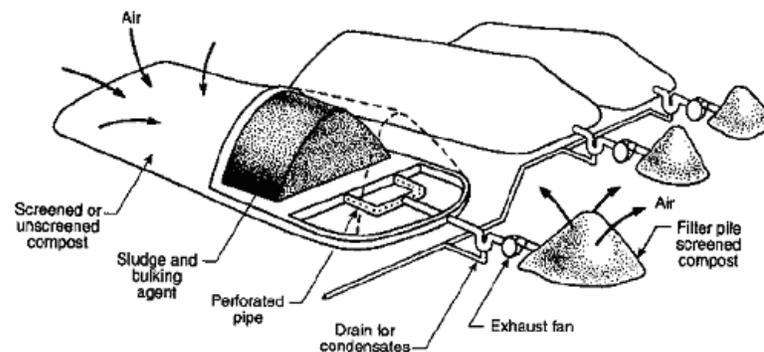


**Figure 12 Compostage par piles retournées combinées à une aération forcée (adaptée de Schuchardt, 2005)**

#### **2.4.1.2. Piles statiques**

L'autre procédé de compostage en système ouvert, les piles statiques, consistent à aérer de manière forcée ou à aspirer l'air des tas via des tuyaux perforés (Mulligan, 2002) (Figure 13).

Les piles sont généralement de 1.5 à 2.7 m de haut, 21 à 27 m de long et 3 à 5.5 m de large et sont recouvertes d'une couche de 0.3 à 1.8 m de compost mature ou d'agent de foisonnement si la pile est recouverte d'une toile ou de 0.4 à 2.4 m s'il n'y en a pas (Mulligan 2002; Shammas et Wang, 2007). Ceci permet de retenir les odeurs et de conserver la chaleur des tas (Shammas et Wang, 2007). Les tuyaux de 10 à 15 cm de diamètre sont placés jusqu'à 1.50 - 2.70 m du bord des piles (Diaz *et al.*, 1993). Dans le compost, ils sont perforés aux 2 à 3 m (Shammas et Wang, 2007) et sont connectés via un tuyau non perforé à un ventilateur (0.25 à 3.73 kW, vitesse de l'air de 35 à 140 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>). Cette aération permet de désodoriser l'air ambiant et de distribuer de manière plus homogène la température (Mulligan, 2002). Les tuyaux sont également recouverts d'agent de foisonnement (0.15 à 0.20 m) afin de faciliter le mouvement et la distribution de l'air et pour absorber l'excès d'eau (Shammas et Wang, 2007).

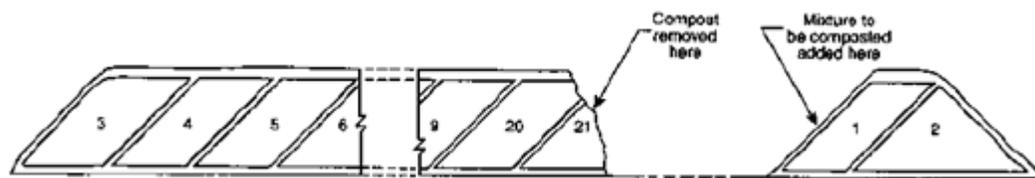


**Figure 13 Installation d'un lieu de compostage à piles aérées (tirée de USEPA, 1979)**

Ce procédé offre une bonne oxygénation, émet peu d'odeur et de contaminants, demande moyennement d'espace, peu de machinerie, et un compost de qualité peut être produit en 5 à 8 mois (Sauvesty et Tabi, 1995; Mulligan, 2002). Les coûts d'opération sont de 12 à 500 \$ tm<sup>-1</sup> et

36 K à 20 M \$ de capital (Mulligan, 2002). Par contre, l'émission de bruits est élevée, le matériel de départ doit être très homogène et poreux, et si le soufflement est inadéquat, des zones anaérobies peuvent être créées (Sauvesty et Tabi, 1995). À l'opposé, une aération excessive peut refroidir la masse à composter et affecter le profil de température (Mason et Milke, 2005).

Une variante aux piles aérées est les piles aérées agrandies (Figure 14). Elle consiste à faire une pile initiale à laquelle à chaque jour, pendant 28 jours, du nouveau matériel à composter est ajouté au bout de la pile. La première partie est enlevée après 21 jours, jusqu'à ce que les sept parties aient été enlevées. Cette méthode nécessite deux fois moins d'espace que les piles individuelles et deux fois moins d'agent de foisonnement et de matériel pour couvrir les piles. Par contre, les coûts d'opération sont augmentés (Shammas et Wang, 2007).



**Figure 14** Configuration d'une pile aérée agrandie (tirée de USEPA, 1979)

#### 2.4.2. Systèmes fermés

Les procédés en systèmes fermés peuvent être subdivisés selon si l'aération est passive (composteur aéré passivement et lombricompostage) ou forcée. Lorsque l'aération est forcée, le contenant peut être statique (bioréacteur horizontal ou vertical) ou agité (composteurs horizontaux avec lit agité, bioréacteurs à écoulement vertical ou bidons rotatoires).

#### **2.4.2.1. Systèmes fermés à aération passive**

Il y a deux grands types de compostage à aération passive: 1) les composteurs aérés passivement dont font partie la plupart des composteurs domestiques et le TEG silo-cage et 2) le lombricompostage.

Les contenants aérés passivement dont font partie la majorité des composteurs domestiques représentent un procédé peu coûteux pouvant traiter à petite échelle les matières hautement putrescibles comme la nourriture (Rynk, 2000a). Un exemple de composteurs domestiques vendus commercialement est le Hot Box. Il possède des parois de bois ou de plastique (1 m x 1 m x 1 m), un couvercle et deux rangées de tuyaux de PVC perforés traversant d'un bout à l'autre le bas et le milieu du contenant pour faciliter l'aération (Figure 15). Le contenant est rempli graduellement et lorsque son contenu s'est dégradé, il suffit de laisser reposer le compost pour compléter la phase de maturation. D'autres composteurs du même type peuvent prendre divers formes ou volumes. Par contre, si le volume de rejets est trop grand, la grosseur des contenants ne pourra pas être augmentée indéfiniment puisque l'aération passive ne sera plus adéquate. Alors, il faudrait augmenter le nombre de contenants, ce qui peut devenir désavantageux (Rynk, 2000a).



**Figure 15 Hot Box (tirée de Archwood Greenhouses, 2008)**

Le TEG silo-cage représente une technologie à aération passive fonctionnant pour de plus gros volumes de rejets (Figure 16) (Rynk, 2000a). Il s'agit de 6 à 20 cages, hautes (4.3 m de haut, 6.1 m de long) et étroites (1.2 m), en grillage, disposées comme les tranches d'un pain. Un espace de 10.2 cm sépare chaque cage afin de permettre la circulation de l'air. Les intrants à composter sont ajoutés sur le dessus des cages et retirés à la base. Avec 10 cages et une période de rétention de 18 jours, 22.5 m<sup>3</sup> de compost peut être produit par jour.

Le lombricompostage, aussi appelé vermicompostage, est une technique de compostage à basse température (5 à 25°C) utilisant des vers (*Lumbricus rubellis* et *Eisenia foetida*) (Mustin, 1987; Mulligan 2002; Garg *et al.*, 2006). Lors de l'ingestion de la matière organique, les vers accélèrent la maturation du compost, diminuent la grosseur des particules, éliminent les vieilles bactéries, stimulent les colonies de nouvelles bactéries et leurs excréments contenant des composés azotés enrichissent le compost (Bouché, 1994; Mulligan, 2002; Garg *et al.*, 2006). De



**Figure 16** Installation d'un TEG silo-cage (tirée de TEG, 2008)

plus, la création par les lombrics de canaux dans le mélange améliore la circulation de l'oxygène, augmente les échanges de carbone et de nutriments entre les bactéries et les protozoaires et régularise les agents pathogènes (Mulligan, 2002).

Le vermicompostage est une technique utilisable à l'intérieur, rentable et rapide (environ 2 mois) pour gérer les résidus organiques solides (Mustin, 1987; Mulligan, 2002; Garg *et al.*, 2006). Le processus a normalement lieu dans lombricubateur: une boîte de plastique ou de bois trouée dans le bas pour permettre le drainage et l'aération (Sauvesty et Tabi, 1995). Un couvert maintient la noirceur et le bon taux d'humidité. Le lombricompostage est simple. La boîte est remplie au  $\frac{3}{4}$  avec 2 kg de vers par kg de rejet par jour et les vers morts doivent être enlevés (Mulligan, 2002). Ce procédé peut être utilisé à grande échelle et opéré en pile (Mulligan, 2002). Les vermicomposteurs peuvent être mécanisés pour permettre de récolter le compost sans les vers. Par contre, cette machinerie plutôt précise (autosélecteur) risque de mal fonctionner (Mustin, 1987). Des lits ou des réacteurs tels que les systèmes de Worm Wigwam (EPM Inc. de Cottage

Grove) (4 000 kg traité an<sup>-1</sup>, aération forcée) et de Vermitech (100 kg traité jour<sup>-1</sup>) sont des formes de vermicompostage à grande échelle (Figure 17) (Mulligan, 2002).



**Figure 17**    **Systèmes de Vermitech (tirée de Vermitech, 2008)**

#### **2.4.2.2.    *Systèmes fermés à aération forcée***

Les systèmes fermés à aération forcée ont un temps de rétention pour la phase thermophile court (généralement 10 à 21 jours) à cause du meilleur contrôle du processus (humidité, température, concentration en oxygène et flux d'air) (Rynk, 2000b; Shamma et Wang, 2007). Par exemple, le système de distribution de l'air peut être grandement automatisé selon la température ou le temps et les flux d'air et leur direction et de leur recirculation peuvent être surveillés (Rynk, 2000a; Mulligan, 2002). L'air soufflé, la plupart du temps de manière intermittente, est généralement humidifié à 50% pour éviter un séchage excessif du compost et la température de l'air est contrôlée (van Bochove *et al.*, 1995; Cronje *et al.*, 2003). Les procédés en système fermé à aération forcée nécessitent moins d'agents de foisonnement et d'espace ce qui est mieux adapté

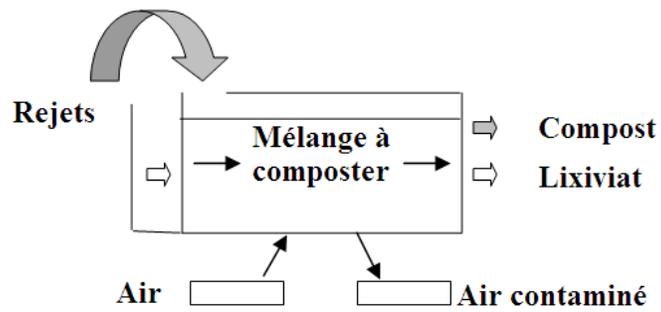
au milieu urbanisé. La main-d'œuvre, moins nombreuse, est aussi moins exposée aux matériaux en compostage. De plus, ces procédés sont plus acceptés du public notamment à cause du meilleur contrôle des odeurs (par biofiltration par exemple) et de la meilleure qualité du produit final (Mulligan, 2002; Shammas et Wang, 2007). Par contre, ils nécessitent une plus grande maintenance de l'équipement et coûtent plus chers (18 à 540 \$  $\text{tm}^{-1}$  de coût d'opération et 850 K à 33 M \$ de capital) (Shammas et Wang, 2007). Par ailleurs, généralement, après la phase thermique, le compost est mis en pile pour la phase de maturation (Ryan 2000b; Shammas et Wang, 2007).

Les procédés à aération forcée peuvent être statiques (bioréacteur horizontal ou vertical) ou agités (composteur horizontal avec lit agité, bioréacteur à écoulement vertical et bidon rotatoire).

### **Systèmes fermés à aération forcée statiques**

Pour les procédés fermés à aération forcée statiques, qu'ils soient des bioréacteurs horizontaux ou verticaux, le lixiviat est généralement collecté dans les espaces d'aération et réutilisé ou récolté dans des réservoirs (Rynk, 2000a). Les bioréacteurs sont remplis à la main, avec une chargeuse, un convoyeur ou une machinerie spécialisée selon le cas (Rynk, 2000a).

Pour les bioréacteurs horizontaux (Figure 18), aussi appelés de type tunnel, les rejets mélangés sont introduits en série à un bout du réacteur puis poussés à travers le bioréacteur et expulsé à l'autre bout du réacteur (Mulligan, 2002; Shammas et Wang 2007). À petite échelle, ce procédé est cher (Mulligan, 2002) et divers produits sont disponibles sur le marché dont le CompTrainer de Green Mountain Technologies (Figure 19) et NaturTech. Ces produits sont modulaires et mobiles. Double-T Equipment (Figure 19) est un type non-mobile (Mulligan, 2002).

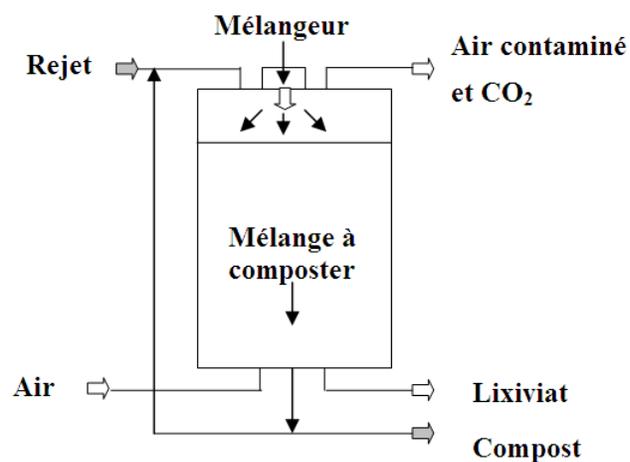


**Figure 18** Bioréacteur horizontal statique (adaptée de Schuchardt, 2005 et de Shammas et Wang, 2007)



**Figure 19** CompTrainer (tirée de Green Mountain Technologies, 2008) et Double-T Equipment (tirée de Double T equipment, 2008)

Dans les bioréacteurs verticaux (Figure 20), les rejets sont introduits dans le haut et le compost est expulsé dans le bas du bioréacteur par une vis tournante (Shammas et Wang, 2007). L'air est introduit par un système au bas du bioréacteur et voyage dans le mélange à composter jusqu'au haut où il est récolté pour être traité ou il sort par des ouvertures dans le haut du bioréacteur (Shammas et Wang, 2007). Ces bioréacteurs ont une distribution moins uniforme de l'oxygène et le procédé B.A.V. de la compagnie Chertsey à Chertsey représente un exemple de ce procédé utilisé au Québec (Sauvesty et Tabi, 1995).

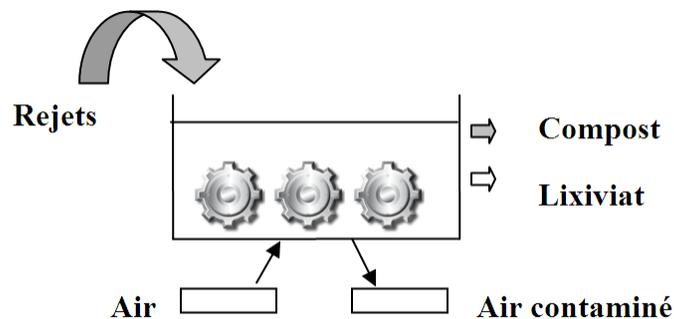


**Figure 20** Bioréacteur vertical (adaptée de Schuchardt, 2005 et de Shammas et Wang, 2007)

## Systèmes fermés à aération forcée agités

Les systèmes à aération forcée fermés et agités sont plus flexibles en ce qui à trait à la quantité et au type d'agent de foisonnement à composter. Habituellement, la quantité d'agent de foisonnement est réduite lorsque le compost est agité. De plus, l'agitation a l'avantage de rendre le produit plus uniforme (Rynk, 2000a). Ce type de procédé inclut les composteurs horizontaux avec lit agité (silo-couloir et les systèmes de type tunnel), les bioréacteurs à écoulement vertical et les bidons rotatoires.

Pour les composteurs horizontaux avec lit agité (Figure 21), les résidus peuvent être mélangés mécaniquement et de l'eau peut être ajoutée contrairement aux bioréacteurs horizontaux qui ne sont pas agités (Schuchardt, 2005). Les appareils pour mélanger peuvent être opérés par des vis ou des rotors horizontaux ou verticaux, des décapeuses ou des tracteurs et l'automatisation complète du processus est possible (Schuchardt, 2005).



**Figure 21** Composteur horizontal avec lit agité (adapté de Schuchardt, 2005)

Les silo-couloirs sont des composteurs avec lits agités. Ils prennent la forme de longs canaux aux murs bétonnés généralement ouverts sur le dessus et l'air soufflé passe par des tuyaux perforés situés au plancher (Sauvesty et Tabi, 1995; Rynk, 2000b; Shammass et Wang, 2007). Les silos-couloirs peuvent être dans une serre ou un autre endroit à l'abri des variations climatiques et munis d'un biofiltre permettant de capter les mauvaises odeurs (Sauvesty et Tabi, 1995). Le lieu fermé est aussi aéré par des ventilateurs (Arnold, 2008). Le temps de compostage de la phase thermophile dépend de la fréquence des mélanges et de la longueur du canal, mais il est généralement de 15 à 28 jours (Rynk, 2000b; Sauvesty et Tabi, 1995). Ce procédé permet une bonne oxygénation et peu de contamination pour donner un compost de qualité. Par contre, l'émission de bruits est élevée et l'approvisionnement du lieu de compostage doit être régulier. De plus, il peut y avoir des risques de mauvais fonctionnements des ventilateurs et du système mélangeant (Sauvesty et Tabi, 1995). Biomax, Farmer Automatic, Global Earth Products (Figure 22), Longwood Manufacturing Corporation (LMC), Ressource Optimization Technologies (ROT Box), Transform Compost Systems Ltd., U.S. Filter (IPS) et Miller Composting System (Ebara Technology) sont des compagnies qui utilisent ce type de procédé. Il est à noter que le compostage en silo-couloirs peut également se faire sans retournements (Sauvesty et Tabi, 1995).



**Figure 22 Le système MARVEL de Global Earth Products (tirée de Global Earth Products, 2008)**

Dans les bioréacteurs à écoulement vertical (système similaire à celui présenté à la Figure 18), l'apport de rejets peut se faire avec ou sans étape et la masse circule du dessus jusqu'au bas ou si le matériel est coincé dans le système, en sens inverse. Il y a une aération forcée qui vient de tuyaux au bas de l'appareil ou de tuyaux verticaux. Ce système peut aussi être totalement automatisé (Schuchardt, 2005).

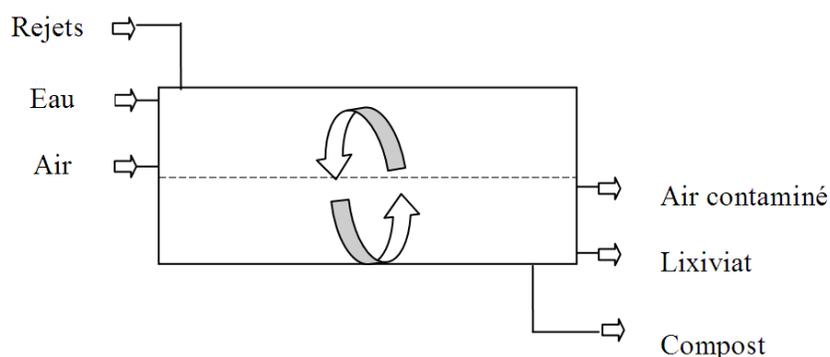
Le Earth Tub est conçu pour être utilisé *in situ* (Figure 23). Les intrants sont ajoutés périodiquement et manuellement dans le bac en tournant le couvercle deux fois et sont broyés par la tarière fonctionnant avec un moteur électrique. Après avoir passé par le couvercle et les conduites du fond du contenant, l'air passe dans un biofiltre (Rynk, 2000a).



**Figure 23 Earth Tub (tirée de Green Mountain Technologies, 2008)**

Wright Environmental Management Inc. fait aussi des bioréacteurs à écoulement vertical, mais ils peuvent traiter de plus grands volumes (135 kg à 900 kg jour<sup>-1</sup>) et ils sont plus automatisés et mécanisés que l'appareil précédent (Rynk, 2000a). En effet, le matériel à composter se déplace dans un tunnel sur un système de rails d'acier inoxydable poussé par un bélier hydraulique externe. Le plancher des rails est perforé et l'air est forcé à l'aide d'une soufflante d'en dessous. L'air est recirculé et éventuellement expulsé au biofiltre. Au point de décharge, une tarière sort le compost sur un rail. Il y a deux zones de températures et d'aération dans le tunnel. Dans la première zone, de hautes températures sont maintenues pour détruire les agents pathogènes en environ six jours. Dans la zone de transition entre les zones 1 et 2, des agitateurs mécaniques mélangent le compost et de l'eau est ajoutée si nécessaire. Aucun opérateur n'a à entrer dans le système s'il n'y a pas de problème. (Rynk, 2000a).

Les bidons rotatoires peuvent être utilisés à petite (compostage domestique) et à grande échelle (Rynk, 2000a). Ils consistent à faire décomposer la matière en la faisant tomber régulièrement dans un bioréacteur fermé rotatif. Les rotations du bidon permettent d'exposer le matériel à l'air, d'ajouter de l'oxygène et de libérer la chaleur et les gaz produits par la décomposition. Les grandeurs des bioréacteurs sont généralement de 1 à 1.5 m de diamètre et 2.5 à 5 m de longueur, mais elles peuvent aller jusqu'à 3 m de diamètre à 15 m de long (Figure 24) (Rynk, 2000a). Les bidons sont orientés horizontalement et parfois légèrement inclinés et sont remplis à environ 50% (Rynk, 2000a; Schuchardt, 2005). Ils sont tournés lentement de manière continue (Greendrum) ou intermittente (Augspurger et EPTC) et l'addition d'eau est possible (Rynk, 2000a; Schuchardt, 2005). Le matériel à composter est généralement intégré à un bout du bidon avec un convoyeur ou une tarière et récolté à l'autre bout par gravité (Rynk, 2000a).



**Figure 24 Bidon rotatoire (adaptée de Schuchardt, 2005)**

Les bidons rotatoires sont commercialisés par plusieurs entreprises (BW Organics (Greendrum), Augspurger Engineering et Environmental Products & Technologies Corporation (EPTC)). L'aération forcée est fréquente, mais n'a pas toujours lieu comme pour la plupart des Greendrum où l'air passe par les ouvertures des bouts du bidon. Ceci permet de fournir assez d'oxygène dans la plupart des cas et des ventilateurs peuvent aussi être utilisés lorsque les bidons sont longs (Rynk, 2000a). Les bidons Augspurger ont des ventilateurs qui bougent l'air au travers des bidons tandis que les systèmes EPTC injectent de l'air riche en oxygène à plus de 80% dans un bidon fermé. Les bidons rotatoires ont des temps de rétentions très courts. Dans le passé, les bidons rotatoires permettaient de faire la phase thermophile et la période de maturation ou seulement la première phase. Cette dernière était suivie d'un compostage en andain. Le système Augspurger utilise cette approche avec sept jours de rétention en bidon suivis de compostage en dehors du bidon. Pour un compostage complet en bidon, trois semaines sont habituellement nécessaires. Le Greendrum nécessite 3 à 5 jours de rétention tandis que le système EPTC n'en a besoin que de 2 à cause de sa haute concentration en oxygène et du bidon plus fermé offrant un meilleur contrôle.

### **3. HYPOTHÈSE DE RECHERCHE, OBJECTIFS SPÉCIFIQUES ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE**

#### **3.1. HYPOTHÈSE DE RECHERCHE**

La compagnie Biscuits Leclerc ([www.leclerc.ca](http://www.leclerc.ca)) est un important producteur québécois de produits céréaliers, de barres collations, de biscuits et de chocolat qui génère des quantités appréciables de rejets organiques. Ces derniers n'ont jamais été inventoriés ni caractérisés dans le but de les composter. Le compostage, une technique de valorisation des rejets organiques, est basé sur la biodégradation et pourrait probablement être utilisé pour générer un compost de haute qualité (type AA selon la norme nationale du Canada (CAN/BNQ 0413-200/2005)). Ceci est basé sur le fait que la nourriture est un matériel facilement dégradé en conditions aérobies (Stabnikova *et al.*, 2005) et que les écailles de cacao possèdent des caractéristiques physico-chimiques particulièrement intéressantes pour être utilisées en tant qu'agent de foisonnement. Ces résidus sont notamment très légers, poreux et lentement biodégradables (Bart-Plange et Baryeh, 2003; Maduako et Faborode, 1994). De plus, comme les coproduits de Biscuits Leclerc proviennent de l'industrie agroalimentaire, ils ne devraient normalement pas contenir beaucoup de contaminants et de corps étrangers. Ces éléments permettent également d'envisager l'obtention d'un compost de haute qualité.

### **3.2. OBJECTIFS SPÉCIFIQUES**

Ce projet a pour but d'évaluer le potentiel de valorisation des coproduits solides et liquides (boues physico-chimiques et boues générées par biofiltration avec les écaïlles de cacao) de Biscuits Leclerc pour la fabrication de composts de haute qualité rencontrant les exigences de composts de type AA selon la norme nationale du Canada (CAN/BNQ 0413-200/2005).

### **3.3. DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE**

La première partie de cette étude consiste à faire l'inventaire et la caractérisation des coproduits organiques des trois usines de Biscuits Leclerc de la région de Québec. Ceci permet d'établir différentes compositions de mélanges d'intrants pour la réalisation d'une première série d'essais de compostage, à petite échelle, par pile retournée manuellement en milieu fermé. Le suivi des piles (pH, température, taux d'humidité) et la caractérisation des produits finaux (maturité des composts, teneur en microorganismes pathogènes, en métaux et en éléments nutritifs) sont effectués. Des essais agronomiques sont faits à partir des composts issus de cette série de compostage afin de comparer l'efficacité fertilisante des composts obtenus à celles d'un compost acheté et de différentes doses d'engrais minéraux. Enfin, pour évaluer l'applicabilité de cette méthode à une échelle industrielle, des essais de compostage à grande échelle sont réalisés avec sensiblement les mêmes suivis et caractérisations finales que ceux des essais précédents. Ces essais sont faits en milieu ouvert et les piles sont retournées mécaniquement.

## 4. MÉTHODOLOGIE

### 4.1. INVENTAIRE ET CARACTÉRISATION DES INTRANTS

L'étude du compostage a commencé par l'inventaire de tous les coproduits compostables (ou intrants) générés lors des opérations de fabrication des produits dans les trois usines (usine de biscuits, usine de barres collations et céréales et usine de production de chocolat) de la région de Québec (Canada) de Biscuits Leclerc. Pour cela, des échanges d'information répétés ont été effectués entre les usines de Biscuits Leclerc et l'INRS-ETE.

Suite à l'analyse des informations fournies par les usines et les caractérisations chimiques des intrants potentiels, des familles de coproduits pouvant être regroupées par leurs similitudes, leurs proximités, ou encore, leurs facilités de regroupement au sein des usines ont été définies. Ces différentes familles sont:

- Biscuits (mélange de différents types de coproduits de production de biscuits);
- Boues biologiques (boues générées par un procédé de biofiltration);
- Boues physico-chimiques (boues directement échantillonnées à la station de traitement des eaux usées de l'usine de biscuits);
- Céréales (coproduits de type céréalier provenant des procédés d'extrusion et de cuisson);
- Écailles de cacao (coproduits provenant de l'usine de fabrication de chocolat).

Afin d'établir les différentes formulations possibles, des caractérisations concernant les solides totaux (ST), le taux d'humidité, la densité en vrac, le contenu en carbone (C), en

azote (N) et en soufre (S), le rapport C/N, les teneurs en autres éléments nutritifs (P, Ca, Mg, Na et K), ainsi que les teneurs en métaux (Al, As, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se et Zn) ont été réalisées sur un total de 31 coproduits différents comprenant: 9 échantillons de résidus de biscuits, 1 échantillon de boues biologiques, 1 échantillon de boues physico-chimiques, 13 échantillons de résidus de céréales, 1 échantillon d'écailles de cacao et 5 résidus de dépoussiéreurs.

## **4.2. ESSAIS DE COMPOSTAGE EN TAS**

### **4.2.1. Essais à petite échelle**

L'étape suivante constituait en la mise en place d'essais de compostage en tas. Six tas d'environ 1.0 m de hauteur de mélanges d'intrants ont donc été préparées et placées dans un vaste hangar recouvert. Le calcul des quantités d'intrants est donc basé sur un volume total approximatif de 2 m<sup>3</sup>. Les quantités utilisées des différents intrants sont présentées au Tableau 8. Il faut noter que pour ces essais, les coproduits de la famille Biscuits sont constitués uniquement de résidus de gaufrettes (sans crème) et que les masses de boues biologiques ont été limités à 5 kg par tas pour des raisons de disponibilité de ces types d'intrants (production à l'échelle du laboratoire uniquement).

Les scénarios testés lors de ces essais peuvent être décrits de la manière suivante:

- Un mélange (C1) avec les intrants proportionnels aux sous-produits générés dans les usines, auquel un brassage était effectué deux fois par semaine et un arrosage était effectué dès que nécessaire, c'est-à-dire lorsque l'humidité était inférieure à 50%;

- Un deuxième mélange (C2) de composition semblable, auquel un brassage et un arrosage étaient effectués aux deux semaines;
- Un mélange (C3) sans intrants de la famille Biscuits, auquel un brassage était effectué deux fois par semaine et un arrosage était effectué dès que nécessaire;
- Un mélange (C4) sans intrants de la famille Céréales, auquel un brassage était effectué deux fois par semaine et un arrosage était effectué lorsque nécessaire;
- Un mélange (C5), avec les intrants proportionnels aux sous-produits générés dans les usines auquel un brassage était effectué une fois par deux semaines et un arrosage était effectué dès que nécessaire;
- Finalement, un mélange (C6) sans intrants des familles Biscuits et Céréales (uniquement des boues et des écailles de cacao) avec brassage deux fois par semaine et arrosage au besoin.

Il faut noter que, lors de cette expérience, les brassages se sont faits manuellement et que les écailles de cacao ont été broyées à 1-2 mm de grosseur pour faciliter leur transport. De même, la famille Céréales était constituée approximativement de 29% de céréales extrudées (maïs, avoines, son de blé), 52% de céréales cuites (riz séché, flocons de maïs, riz croustillant, etc.) et 19% de flocons d'avoines et barres collations (céréales, fruits secs, caramel, chocolat et yogourt sucré agglomérés et utilisés pour la fabrication de barres collations).

**Tableau 8 Composition des mélanges d'intrants pour les essais de compostage à petite échelle**

| Familles d'intrants                         | Mélanges     |              |              |              |              |              |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|   | C1           | C2           | C3           | C4           | C5           | C6           |
| Boues biologiques (kg)                      | 5            | 5            | 5            | 5            | 5            | 5            |
| Boues physico-chimiques (kg)                | 145          | 145          | 145          | 145          | 145          | 145          |
| Biscuits (kg)                               | 50           | 50           | 0            | 50           | 50           | 0            |
| Écailles de cacao (kg)                      | 300          | 300          | 350          | 550          | 312          | 600          |
| Céréales (kg)                               | 250          | 250          | 250          | 0            | 250          | 0            |
| Eau (kg)                                    | 200          | 200          | 200          | 200          | 200          | 200          |
| Total (kg)                                  | 950          | 950          | 950          | 950          | 962          | 950          |
| <i>Eau ajoutée durant le compostage(kg)</i> | <i>2 000</i> | <i>1 625</i> | <i>2 312</i> | <i>2 415</i> | <i>2 173</i> | <i>2 290</i> |

Les essais de compostage ont été réalisés sur une période de quatre mois (130 jours), soit du 10 juillet au 16 novembre 2007. Par la suite, les composts ont été stockés à l'intérieur des bâtiments de l'INRS-ETE pour la phase de maturation, laquelle s'est déroulée jusqu'au printemps 2008. La Figure 25 montre les installations des tas au démarrage des essais de compostage.

Des prélèvements et ajustements de l'humidité (par arrosage) des tas de compost ont été effectués au besoin à une fréquence de deux fois par semaine ou une fois aux deux semaines selon le mélange et ce, tout au long de la période de compostage. Les quantités d'eau à ajouter ont été déterminées en se basant sur les mesures de solides totaux effectuées lors du prélèvement précédent et ce, de manière à essayer de maintenir une teneur en eau se situant en tout temps entre 40 et 60%.



**Figure 25 Installations des tas au démarrage des essais de compostage**

#### **4.2.2. Essais à grande échelle**

Ensuite, avec deux des compositions utilisées lors des essais à petite échelle, des essais à plus grande échelle ont été réalisés. Les tas étaient situés à l'extérieur. Les quantités utilisées des intrants sont présentées au Tableau 9. Les piles T1 et T2 avaient un volume initial semblable. Contrairement aux essais à petite échelle, les coproduits de la famille Biscuits étaient constitués de gaufrette avec crème seulement. Les deux compositions des tas testés étaient celles correspondant :

- Aux piles C1-C2 et C5 proportions se rapprochant de celles proportionnelles à celles générées dans les usines (T1);
- À la pile C6 soit composée uniquement des boues physico-chimiques et biologiques et des écailles de cacao (T2).

**Tableau 9 Composition des mélanges d'intrants pour les essais de compostage à grande échelle**

| Familles d'intrants          | Mélanges |       |
|------------------------------|----------|-------|
|                              | T1       | T2    |
| Boues biologiques (kg)       | 105      | 50    |
| Boues physico-chimiques (kg) | 3 000    | 1 500 |
| Biscuits (kg)                | 1 450    | 0     |
| Écailles de cacao (kg)       | 6 300    | 6 300 |
| Céréales (kg)                | 3 330    | 0     |
| Total (kg)                   | 14 185   | 7 850 |

Des arrosages étaient prévus afin de maintenir un niveau d'humidité d'environ 50%. Étant donné les précipitations abondantes reçues durant la période d'étude, aucun arrosage n'a été effectué. Les brassages étaient faits avec une pelle mécanique (Figure 26) à une période approximative d'une semaine d'intervalle soit les 25 juin, 1-11-18-24 juillet, 5-11-15-22 août, 3-10-20-28 septembre, 5-12-19 octobre, 2-9-16-24 novembre 2008.

Contrairement, aux essais de compostage à petite échelle, les écailles de cacao n'ont pas été broyées. Par ailleurs, à cause de contraintes techniques, les boues physico-chimiques de la pile T2 ont été apportées seulement au 18<sup>ème</sup> jour. La famille des céréales étaient constituée approximativement de 27% de céréales extrudées (avoine et son de blé), 41% de céréales cuites (riz croustillant, flocon de maïs et de riz «*General Mills*») et 32% de flocons d'avoine et de barres collations (céréales, fruits secs, caramel, chocolat et yogourt sucré agglomérés et utilisés pour la fabrication de barres collations).

Les essais de compostage se sont déroulés de la mi-juillet à la fin novembre 2008. Des prélèvements ont été effectués à toutes les semaines durant l'été (jusqu'au 42<sup>ème</sup> jour: 26 août), puis aux deux semaines.



**Figure 26** Pile T2 et pelle-mécanique utilisée pour les essais à grande échelle

#### **4.3. ESSAIS AGRONOMIQUES**

Afin d'évaluer l'efficacité fertilisante des composts obtenus lors des essais à petite échelle, des essais agronomiques ont été réalisés à Saint-Albert-de-Warwick (à 16 km de Victoriaville, QC), sur le lot 903 du rang VIII dans le canton de Warwick. Le type de sol, appartenant à la série St-Jude, a une texture de type sable à sable loameux et est drainé

naturellement (le drainage du sol est excellent). Aucun chaulage d'appoint n'a été effectué puisque la parcelle a un excellent pH tampon. D'autres caractéristiques chimiques du sol sont présentées au Tableau 10.

**Tableau 10 Caractéristiques chimiques initiales du sol**

| Caractéristiques                  | Loam sableux (champ 29-2) |
|-----------------------------------|---------------------------|
| pH eau                            | 6.1                       |
| pH tampon                         | 6.8                       |
| % matière organique               | 4.1                       |
| CEC (méq 100 g <sup>-1</sup> )    | 9.2                       |
| P Mehlich* (kg ha <sup>-1</sup> ) | 95                        |
| K Mehlich (kg ha <sup>-1</sup> )  | 173                       |
| Ca Mehlich (kg ha <sup>-1</sup> ) | 2500                      |
| Mg Mehlich (kg ha <sup>-1</sup> ) | 248                       |
| Al Mehlich (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1730                      |

\* Méthode servant à déterminer la quantité de base échangeable

Un total de 40 parcelles d'orge (*Hordeum vulgare* variété Chambly, semences certifiées catégorie #1 et traitées avec des fongicides) et 40 parcelles de lin (*Linum usitatissimum* variété Béthune, semences certifiées catégorie #1) a été cultivé avec différents traitements. L'orge a été utilisée, car c'est une plante qui répond très bien aux apports de fertilisants azotés et elle est largement utilisée en agronomie pour des essais d'efficacité fertilisante avec divers types d'amendements organiques. Le lin a été testé puisque Biscuits Leclerc envisage d'en faire la culture et de l'enrichir avec leur compost. Chaque parcelle avait une dimension de 2 m par 2 m. Chacun des traitements suivants a été appliqué en quadruplicata (quatre répétitions):

- Sans amendement (E0);
- Engrais minéraux répondant à 25%, 50%, 100% et 150% des besoins en azote de l'orge et du lin (E25, E50, E100, E150) en se basant sur les données du *Guide de référence en fertilisation* du CRAAQ (2003);
- Compost de fumier de mouton acheté (CA) à une dose correspondant à 100% des besoins en azote pour les cultures;
- Composts C1, C3, C4 et C6 soit les composts répondant aux critères de qualité AA (norme BNQ), à une dose correspondant à 100% des besoins en azote pour les cultures.

Les parcelles d'engrais minéraux ont été faites principalement pour évaluer l'efficacité fertilisante des composts Biscuits Leclerc. Les engrais de base utilisés ont été le nitrate d'ammonium (27.5-0-0), le phosphate di-ammonium (18-46-0), le superphosphate triple (0-46-0) et le muriate de potassium (0-0-60).

La disposition des parcelles des essais agronomiques a été déterminée par bloc entièrement aléatoire (annexe A) et les quantités de composts et d'engrais minéraux épandues par parcelle sont présentées aux Tableaux 11 et 12 respectivement. Les quantités de composts à épandre ont été déterminées selon un coefficient d'efficacité de 40% pour l'azote total durant la période de croissance. Ce critère provient d'un estimé de ce qui est généralement observé pour des composts de type végétal. Le présent projet vise justement à déterminer ces coefficients.

**Tableau 11 Quantité de compost épandu (sur base humide) sur les parcelles d'orge et de lin pour combler 100% des besoins en azote des cultures**

| Composts | Quantités épandues par parcelles (kg) |       |
|----------|---------------------------------------|-------|
|          | Orge                                  | Lin   |
| C1       | 2.4                                   | 1.5   |
| C3       | 2.0                                   | 1.2   |
| C4       | 3.2                                   | 2.0   |
| C6       | 3.3                                   | 2.0   |
| CA       | 16.0*                                 | 10.0* |

\* Après vérification, la quantité de compost achetée et épandue répond à 155% des besoins en azote de l'orge et du lin (Tableaux 31 et 33)

**Tableau 12 Quantité d'engrais minéraux épandue sur les parcelles d'orge et de lin**

| Pourcentage des besoins de l'espèce (%) | Concentration de l'azote épandue sur les parcelles (kg ha <sup>-1</sup> ) |     |
|---|---|-----|
|   | Orge  | Lin |
| 0                                       | 0   | 0   |
| 25                                      | 20  | 12  |
| 50                                      | 40  | 25  |
| 100                                     | 80  | 50  |
| 150                                     | 120   | 75  |

Puisque les composts ont été entreposés durant presque quatre mois, ils ont été analysés une seconde fois, pour déterminer le pourcentage de matière sèche ainsi que la quantité d'azote total, juste avant les épandages au champ. Cette mesure avait pour but d'appliquer les quantités d'azote réellement nécessaires pour les cultures, puisqu'il a été supposé que ces valeurs avaient pu évoluer avec la durée d'entreposage. Pour des raisons techniques, ces analyses n'ont pas été effectuées sur les autres éléments fertilisants puisque c'est

principalement l'azote qui est à l'étude. Le Tableau 13 permet de visualiser l'évolution du pourcentage de matière sèche et de l'azote total du mois de décembre au mois de mai (période d'entreposage).

**Tableau 13 Évolution des teneurs en azote total et du pourcentage de matière sèche pré et post-entreposage**

| Type de compost | Concentration en azote totale (kg tm <sup>-1</sup> ) |                  | Pourcentage de matière sèche (%) |                  |
|-----------------|--|------------------|----------------------------------|------------------|
|                 | Pré-entreposage                                      | Post-entreposage | Pré-entreposage                  | Post-entreposage |
| C1              | 64.4   | 67.9             | 59.8                             | 50.6             |
| C3              | 62.8   | 76.8             | 53.3                             | 48.0             |
| C4              | 53.9   | 50.8             | 55.3                             | 51.3             |
| C6              | 49.1   | 51.4             | 57.2                             | 52.4             |

Les quantités de compost à épandre sur les parcelles ont donc été calculées en tenant compte de l'évolution physico-chimique des composts durant la période d'entreposage.

Les parcelles d'orge sous engrais minéral ont également été enrichies en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (40 kg ha<sup>-1</sup>) et en K<sub>2</sub>O (50 kg ha<sup>-1</sup>), tandis que le lin a eu un enrichissement supplémentaire de 30 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> et 20 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. Ces ajouts ont été déterminés en tenant compte de la richesse du sol et des besoins en éléments minéraux recommandés par le Guide de recommandation en fertilisation du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2003). À ce sujet, les besoins en phosphore et en potassium pour la culture du lin sont similaires à ceux du sarrasin. Les quantités de chaque engrais minéral mis par parcelle sont présentées à l'annexe B.

En 2007, les parcelles où les essais agronomiques ont été réalisés avaient été ensemencées en cultures maraîchères, soit des courges et des citrouilles. Pour diverses raisons techniques, toutes les opérations culturales ainsi que le semis des cultures ont été effectués tard en saison en 2008. Avant l'épandage des engrais minéraux et composts, le sol a préalablement été hersé au cultivateur (dents rigides) à deux reprises. L'application et l'enfouissement des composts et engrais minéraux se sont faits manuellement le 5 juin. Les semis ont été effectués le 8 juin 2008 avec un semoir conventionnel de modèle CASE ayant des disques espacés de 17.8 cm (7 pouces). La profondeur des semis a été de 2.5 cm pour l'orge et le lin. Des herbicides anti-graminée ont été appliqués le 27 juin 2008 sur les parcelles d'orge (HOE-GRASS à 2.5 L ha<sup>-1</sup>) et de lin (POAST ULTRA à 0.35 L ha<sup>-1</sup> et ASSIST (un adjuvant) à 1 L ha<sup>-1</sup>). La pulvérisation a été effectuée avec un pulvérisateur à rampe standard muni de buses à jet porté. Les mauvaises herbes à feuilles larges, très peu nombreuses, ont été désherbées à la main; aucune pulvérisation d'herbicide n'a été nécessaire pour ce type de mauvaises herbes. L'orge a été récoltée le 20 septembre 2008 et le lin les 10 et 15 octobre 2008.

Après avoir été récolté, les grains d'orge ont été extraits à la batteuse stationnaire et criblés (cribleur The Clipper) avec une passe 5/64'' x 3/4''. Le lin a été extrait manuellement, puis criblé avec des passes 1/14'' x 1/4'' et 1/14'' rond. Les teneurs en humidité (%) et en protéine brute (%) ont été déterminées avec l'appareil Infratec 1241 Grain Analyser au proche infra-rouge avec la courbe officielle de la Commission canadienne des grains pour l'orge. La teneur en humidité pour le lin a été déterminée selon les protocoles des méthodes 2540 B et 2540 G de l'APHA *et al.* (1999). La hauteur des plants (cm) a été mesurée pour chacune des parcelles lors de la récolte. Le rendement des cultures (poids total des grains

(kg ha<sup>-1</sup>) a été calculé à partir d'un échantillonnage d'un mètre carré dans chacune des parcelles. Le poids aux milles grains a été effectué avec le compteur de grain d'Agricullex Inc. avec 500 grains maximum pour l'orge et manuellement avec 200 grains pour le lin.

#### **4.4. MÉTHODES ANALYTIQUES**

##### **4.4.1. Solides, pH et température**

Les solides totaux (ST) et les solides volatils (SV) ont été mesurés en duplicata selon les protocoles des méthodes 2540 B et 2540 G de l'APHA *et al.* (1999).

Les mesures de pH sur les composts, les intrants et le lixiviat ont été réalisées en duplicata suivant la méthode IRDA-AS-201-R0 à l'aide d'un pH-mètre *Accumet Research* modèle *AR 25 Dual Channel pH/Ion meter* de *Fisher Scientific* (Nepean, ON, Canada). Cet appareil est muni d'une électrode de pH Ag/AgCl de marque *Cole Parmer* (*Cole Parmer Instrument*, Anjou, QC, Canada).

Le suivi de la température des tas de composts a été effectué à l'aide de deux thermomètres digitaux de marque *Acorn* munis de sondes RTD de 10 et 18 pouces de longueur (*Cole Parmer Instrument*), lesquelles étaient plongées à l'intérieur des tas de compost. Pour chaque tas de compost des essais à petite échelle, un total de cinq mesures ont été prises à différents endroits et une valeur moyenne a ainsi été calculée à partir de ces valeurs. Pour les essais de compostages à grande échelle c'est un total de 10 mesures qui ont été prises.

#### 4.4.2. Éléments nutritifs

Les teneurs en Ca, K, Mg, Na et P ont été déterminées par spectrophotométrie à émission de plasma induit (ICP-AES) (Méthode EPA 6010 B) sur un appareil *Varian* (modèle *Vista AX CCO Simultaneous ICP-AES*, Palo Alto, CA, USA). Les digestions des échantillons d'intrants de compostage, de composts (1 g sec d'échantillon), de lixiviat (10 mL liquide d'échantillon) et de grains d'orge et de lin (0.5 g sec d'échantillon) ont été réalisées en triplicata selon la méthode MENVIQ.89.12/213.Mét 1.3 pour les intrants et selon la méthode 3050B de l'APHA *et al.* (1999) pour le compost, le lixiviat et les grains issus des essais agronomiques. Les grains d'orge et de lin ont été digérés avec l'appareil Digi PREP Jour. de Scp Science. Le  $P_{\text{tot}}$  dans les eaux usées a été mesuré par ICP-AES après digestion acide selon la méthode 3030I de l'APHA *et al.* (1999). Des échantillons certifiés CRM PQ-1 (lot #7110C513, *CANMET, Canadian Certified Reference Materials Project (CCRMP)*) ont également été digérés en tant que contrôles. Des contrôles de qualité ont été effectués en analysant des échantillons liquides certifiés (lot SC0019251, no. catalogue 900-Q30-002, multi-elements standard, *SCP Science*, Lasalle, QC, Canada).

#### 4.4.3. Ratio C/N

Le ratio C/N des intrants de compostage, des composts et du lixiviat a été déterminé suite à l'analyse élémentaire de carbone, d'azote et de soufre par la méthode CHNS 412.1 sur un analyseur *Leco* (modèle *HCNS-932*, St-Joseph, MI, USA). Les teneurs en azote total, carbone et soufre des grains des essais agronomiques ont également été déterminées par cette méthode.

#### **4.4.4. Métaux**

Les métaux (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Zn) contenus dans les intrants de compostage, les composts, le lixiviat et les grains d'orge et de lin ont été mesurés par ICP-AES (Méthode EPA 6010 B). La méthode de digestion MENVIQ.89.12/213.Mét 1.3 (HNO<sub>3</sub> et H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) a été utilisée sur des masses de 0.5 g de coproduits secs et 1.0 g de boues (physico-chimiques et biologiques) pour l'extraction des métaux et la méthode de digestion 3050B a été utilisée sur 1.0 g de compost sec, 10 mL de lixiviat et 0.5 g de grain d'orge et de lin. Les teneurs en Hg ont été déterminées sur les composts finaux C1 à C6 au laboratoire de la compagnie *Bodycote Groupe d'Essais* (Québec, QC, Canada) (méthode QC068-96/digestion acide, dosage AA (vapeur froide)).

#### **4.4.5. Tests de maturité**

Les tests standards de la compagnie *Woods End Research Laboratory Incorporated* ont été réalisés afin d'évaluer l'état de maturité (stabilité) des composts. Ces tests comprennent un test de hausse de la température (Dewar Self-Heating Test) (WERLI, 2005), un test de production de gaz ammoniacal (NH<sub>3</sub>) (WERLI 2006a) et un test de production de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) (WERLI 2006b). Ces deux derniers tests ont également été utilisés pour le suivi des composts à grande échelle.

#### **4.4.6. Mesures microbiologiques**

Des échantillons de compost ont été acheminés au laboratoire de la compagnie *Bodycote Groupe d'Essais* (Québec, QC, Canada) pour des mesures de coliformes fécaux (méthode MA 700-EC-TM-1.0), de bactéries hétérotrophes aérobies (BHAA à 35°C) (méthode MFMPB-18) et de salmonelles (méthode MA700Sal-PA).

#### **4.5. ANALYSES STATISTIQUES**

Pour évaluer l'effet des divers types d'amendement sur les paramètres mesurés sur l'orge et le lin des tests de comparaisons de moyennes ont été faits avec le logiciel *Analyse-it*. Lorsque c'était possible une ANOVA à un facteur a été faite. S'il y avait une différence significative entre les moyennes obtenues avec les différents types d'amendement utilisés, elle était suivie du test de comparaisons multiples LSD (Least significant difference test). Lorsque le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis devait être utilisé, selon le résultat, il était suivi du test de Dunn. Le niveau  $\alpha$  était de 0.05.

## **5. RÉSULTATS ET DISCUSSION**

### **5.1. INVENTAIRE DES INTRANTS DE COMPOSTAGE**

Les différents coproduits des trois usines de Biscuits Leclerc de la région de Québec potentiellement valorisables par compostage ont été classés en cinq familles d'intrants. Ces différentes familles sont:

- Biscuits;
- Boues biologiques;
- Boues physico-chimiques;
- Céréales;
- Écailles de cacao.

À priori, les poudres généralement trop fines et qui nuisent au caractère aérobie nécessaire au compostage, ainsi que les pâtes à biscuits non cuites, trop compactes ont été écartées de ces familles.

Le Tableau 14 montre la répartition estimée de la production des différentes familles de coproduits potentiellement valorisables par compostage. Selon les estimés, un total d'environ 3 500 tmh de coproduits potentiellement valorisables par compostage est actuellement généré par année dans les trois usines de Biscuits Leclerc de la région de Québec. À ce total, il est prévu que l'ajout d'un traitement biologique en aval du traitement physico-chimique des effluents des usines de Biscuits Leclerc de Saint-Augustin génère

environ 685 tm. an<sup>-1</sup>, ce qui donnerait un total de coproduit d'approximativement 4 200 tm. an<sup>-1</sup>.

Il est également possible que la production d'écailles de cacao augmente significativement si l'usine de chocolat de Québec augmente sa production. La production des écailles de cacao équivaut environ à 15% de la production de chocolat. Ainsi, actuellement, l'usine fabrique 24 tm de chocolat par jour, ce qui résulte en une production approximative de 4 tm d'écailles de cacao par jour.

**Tableau 14 Production estimée des différents intrants potentiels de compostage de Biscuits Leclerc**

| <b>Familles d'intrants</b> | <b>Quantités disponibles<br/>(tmh. an<sup>-1</sup>)</b> | <b>Proportions<br/>(% p p<sup>-1</sup>)</b> |
|----------------------------|---|---|
| Biscuits                   | 288   | 6.8   |
| Boues biologiques          | 685   | 16.3  |
| Boues physico-chimiques    | 624   | 14.8  |
| Céréales                   | 1 152   | 27.4  |
| Écailles de cacao          | 1 460   | 34.7  |
| Total                      | 4 209   | 100.0                                       |

Les Tableaux 15 et 16 montrent les proportions relatives des différents regroupements de coproduits constituant les familles Biscuits et Céréales. La production de résidus de gaufrettes (avec ou sans crème) représente de loin le principal coproduit de la famille Biscuits avec environ 76% des coproduits générés à l'usine de Biscuits. La famille Biscuits

ne constitue toutefois que 6.8% de la masse totale de coproduits actuellement prévue pour une valorisation en compostage.

**Tableau 15 Proportions relatives des coproduits de la famille Biscuits**

| <b>Coproduits</b>       | <b>Proportions (%)</b> | <b>Remarques</b>                                  |
|-------------------------|------------------------|---|
| Barres aux fruits       | 4                      | Barres avec confiture                             |
| Biscuits chocolat       | 2                      | Biscuits secs + chocolat                          |
| Biscuits ronds          | 4                      | Biscuits éponges                                  |
| Biscuits ronds chocolat | 2                      | Enrobés de chocolat                               |
| Gaufrettes              | 76                     | Avec crème ou sans crème                          |
| Pâtes à biscuits        | 0                      | Non utilisées lors de la préparation des composts |
| Quatro fudge            | 2                      | Biscuits tout chocolat                            |
| Thé social              | 10                     | Biscuits secs rectangulaires                      |
| Total                   | 100                    |   |

**Tableau 16 Proportions relatives des coproduits de la famille Céréales**

| <b>Coproduits</b>  | <b>Proportions (%)</b> | <b>Remarques</b>  |
|--------------------|------------------------|---|
| Céréales extrudées | 26                     | Riz Leclerc et General Mills, Avoines (Mix Cheerios), Son de blé (All Bran)   |
| Céréales cuites    | 51                     | Riz cuit, Riz séché, Riz croustillant (Rice Crispy), Maïs non cuit, Flocons de maïs avec raisin (Corn flakes avec raisins), Poussières de flocons de maïs |
| Flocons d'avoine   | 6                      | Céréales utilisées pour les barres tendres  |
| Barres tendres     | 17                     | Céréales et fruits agglomérés   |
| Dépoussiéreurs     | 0                      | Non utilisés lors de la préparation des composts  |
| Total              | 100                    |   |

La famille Céréales représente une portion appréciable (27.4%) de la masse totale de coproduits potentiels pour une valorisation en compostage. La réalisation d'un inventaire précis des coproduits générés à l'usine de céréales de Biscuits Leclerc représente toutefois un défi important considérant la diversité des résidus produits, les nombreux points de prélèvement possibles, ainsi que la variation des cycles de production des différents produits de céréales et de barres tendres fabriquées à cette usine. Les principaux coproduits potentiellement intéressants pour le compostage sont des rejets de différentes céréales (riz, avoine, maïs, blé) ayant subi les procédés d'extrusion et de cuisson.

## **5.2. CARACTÉRISATION DES INTRANTS DE COMPOSTAGE**

Le Tableau 17 montre les caractéristiques physico-chimiques moyennes des coproduits des différentes familles d'intrants de compostage. Les valeurs moyennes ont été calculées en tenant compte des proportions relatives de chaque coproduit constituant une famille d'intrants. Les données détaillées concernant chacun des coproduits analysés lors de l'inventaire sont présentées en annexe C (certains nouveaux coproduits ont été analysés par la suite et sont présentés à la fin de l'annexe C).

Les données des coproduits montrent notamment que ceux-ci présentent des caractéristiques très diversifiées en termes de teneurs en eau (1.2% pour les écailles de cacao à 83.0% pour les boues biologiques) et de rapport C/N (17 pour les boues biologiques et les écailles de cacao à 51 pour les boues physico-chimiques). Ces écarts importants en ce qui concerne ces deux paramètres de base représentent une information de première importance pour la formulation des mélanges d'intrants de compostage.

**Tableau 17 Caractéristiques des coproduits des différentes familles d'intrants utilisés lors des essais de compostage à petite échelle**

| Paramètres    | Unités                 | Biscuits | Boues biologiques | Boues physico-chimiques | Céréales | Écailles de cacao | Normes (AA) |
|---------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------------|----------|-------------------|-------------|
| Teneur en eau | (% p p <sup>-1</sup> ) | 13.3     | 83.0              | 59.8                    | 7.3      | 1.2               |             |
| Densité       | (g cm <sup>-3</sup> )  | 0.07     | 0.34              | 1.16                    | 0.45     | 0.30              |             |
| C             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 448      | 464               | 599                     | 444      | 436               |             |
| N             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 15.0     | 28.0              | 11.7                    | 14.2     | 25.9              |             |
| Rapport C/N   |                        | 29.9     | 16.6              | 51.2                    | 33.3     | 16.8              |             |
| S             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 0.05     | 0.27              | 0.11                    | 0.10     | 0.15              |             |
| P             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 1.10     | 0.04              | 1.12                    | 2.24     | 3.74              |             |
| Ca            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 0.26     | 0.10              | 0.58                    | 0.90     | 3.20              |             |
| Mg            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 0.30     | 0.05              | 0.06                    | 0.49     | 5.38              |             |
| Na            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 0.96     | 0.06              | 1.61                    | 5.03     | 0.09              |             |
| K             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 1.61     | 0.02              | 0.30                    | 1.91     | 27.5              |             |
| Al            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 4.35     | 4.38              | 171                     | 10.7     | 364               |             |
| As            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.48     | 0.80              | 0.56                    | 0.40     | 0.90              | ≤ 13.0      |
| Cd            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.04     | 0.20              | 0.21                    | 0.06     | 0.15              | ≤ 3.0       |
| Cr            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.99     | 2.50              | 12.2                    | 0.15     | 1.40              | ≤ 210       |
| Co            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | <0.06    | 1.46              | <0.06                   | 0.20     | 1.28              | ≤ 34.0      |
| Cu            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 8.40     | 36.7              | 109                     | 3.40     | 30.6              | ≤ 400       |
| Fe            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 70.8     | 2 340             | 4 310                   | 45.6     | 457               |             |
| Mn            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 6.77     | 70.0              | 12.9                    | 8.03     | 53.9              |             |
| Mo            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.54     | 1.29              | 2.12                    | 0.59     | <0.39             | ≤ 5.0       |
| Ni            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.40     | 13.4              | 5.91                    | 2.01     | 14.8              | ≤ 62        |
| Pb            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.28     | 2.00              | 5.47                    | 0.11     | 0.60              | ≤ 150       |
| Se            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | <0.63    | <0.63             | <0.63                   | <0.63    | <0.63             | ≤ 2.0       |
| Zn            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 7.68     | 67.2              | 34.0                    | 47.1     | 59.6              | ≤ 700       |

Les biscuits utilisés lors des essais de compostage étaient des gaufrettes. Ce coproduit a une très faible densité. C'est d'ailleurs pour cette raison que l'entreprise doit en disposer. Étant très fragiles et légères, les gaufrettes se cassent plus facilement lors de leur production.

Bien que les écailles de cacao possèdent un faible rapport C/N, il faut souligner que la disponibilité de l'azote dans cet intrant est généralement plus faible que pour d'autres substrats organiques plus facilement biodégradables (Noble *et al.*, 2002). Les écailles de cacao sont également une excellente source de nutriments, notamment en phosphore (3.7%), calcium (3.2%), magnésium (5.4%) et potassium (27.5%). De même, les écailles de cacao constituent également un excellent agent de foisonnement pour la préparation de compost étant donné, d'une part, sa très faible densité en vrac ( $0.30 \text{ g cm}^{-3}$ ), ainsi que, d'autre part, sa granulométrie relativement grossière et homogène. Ces résidus sont notamment très légers, poreux et lentement biodégradables (Bart-Plange et Baryeh, 2003; Maduako et Faborode, 1994).

En ce qui concerne les éléments traces, les teneurs présentes dans les intrants potentiels de compostage sont nettement inférieures aux valeurs prescrites dans la norme nationale du compost de type AA. Il faut toutefois noter que les boues physico-chimiques utilisées comme intrant de compostage représentent le matériel le plus contaminé en métaux, principalement en Cr, Cu, Fe, Pb et Zn. Cette contamination provient en bonne partie de l'addition de sulfate ferrique commercial lors du procédé physico-chimique (coagulation-floculation et flottation) de traitement des effluents.

Le Tableau 18 présente les caractéristiques des coproduits utilisés lors des essais de compostage à grande échelle. Les caractéristiques des coproduits sont différentes de celles des essais à petite échelle pour les familles des biscuits et des céréales. Les quelques variations sont attribuables aux différentes proportions et coproduits utilisés. Les boues physicochimiques sont également légèrement différentes. À noter que le pH des intrants est légèrement acide à l'exception des boues biologiques.

### **5.3. ESSAI DE COMPOSTAGE À PETITE ÉCHELLE**

#### **5.3.1. Composition initiale des mélanges de compostage**

Le Tableau 19 montre les caractéristiques des mélanges initiaux d'intrants utilisés lors des essais de compostage à petite échelle. Les valeurs ont été calculées en considérant les proportions relatives de chaque famille d'intrants lors de la préparation des mélanges.

Malgré un apport en eau lors de la préparation des mélanges, la teneur initiale en eau des tas de compost était inférieure à 50%. De fait, des quantités importantes d'eau ont dû être ajoutées en cours de compostage afin de maintenir une teneur en eau voisine de 50%. Le poids sec initial des différents tas de composts était compris entre 631 et 652 kg.

Le rapport C/N des différents mélanges était de 22-23 pour les tas C1, C2, C3 et C5, alors qu'il était de 18-19 dans le cas des tas C4 et C6. La présence d'une proportion plus importante d'écaillés de cacao (rapport C/N de 16.8) dans ces derniers explique le plus faible rapport C/N pour ces deux tas.

**Tableau 18 Caractéristiques des coproduits des différentes familles d'intrants utilisés lors des essais de compostage à grande échelle**

| Paramètres    | Unités                 | Biscuits | Boues biologiques | Boues physico-chimiques | Céréales | Écailles de cacao | Normes (AA) |
|---------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------------|----------|-------------------|-------------|
| Teneur en eau | (% p p <sup>-1</sup> ) | 7.7      | 83.0              | 75.5                    | 11.1     | 1.2               |             |
| Densité       | (g cm <sup>-3</sup> )  | 0.17     | 0.34              | 1.03                    | 0.30     | 0.30              |             |
| pH            |                        | 5.60     | 8.20              | 3.46                    | 5.14     | 5.50              |             |
| C             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 482      | 464               | 407                     | 398      | 436               |             |
| N             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 10.2     | 28.0              | 9.2                     | 16.7     | 25.9              |             |
| Rapport C/N   |                        | 47.3     | 16.6              | 44.2                    | 25.1     | 16.8              |             |
| S             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 0.09     | 0.27              | 1.10                    | 0.11     | 0.15              |             |
| P             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 0.81     | 0.04              | 2.12                    | 2.92     | 3.74              |             |
| Ca            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 0.21     | 0.10              | 6.33                    | 2.02     | 3.20              |             |
| Mg            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 0.21     | 0.05              | 0.21                    | 0.64     | 5.38              |             |
| Na            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 0.95     | 0.06              | 2.64                    | 6.35     | 0.09              |             |
| K             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 1.18     | 0.02              | 0.83                    | 2.73     | 27.5              |             |
| Al            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 6.06     | 4.38              | 129                     | 14.4     | 364               |             |
| As            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.33     | 0.80              | 0.30                    | 0.71     | 0.90              | ≤ 13.0      |
| Cd            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.04     | 0.20              | 0.07                    | 0.07     | 0.15              | ≤ 3.0       |
| Cr            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.82     | 2.50              | 7.18                    | 0.37     | 1.40              | ≤ 210       |
| Co            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | <0.06    | 1.46              | 0.35                    | 0.39     | 1.28              | ≤ 34.0      |
| Cu            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 6.98     | 36.7              | 55.0                    | 9.96     | 30.6              | ≤ 400       |
| Fe            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 54.8     | 2 340             | 4 990                   | 37.2     | 457               |             |
| Hg            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | -        | -                 | -                       | -        | -                 | ≤ 0.80      |
| Mn            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 4.87     | 70.0              | 40.1                    | 13.8     | 53.9              |             |
| Mo            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.40     | 1.29              | 1.55                    | 0.57     | <0.39             | ≤ 5.0       |
| Ni            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.36     | 13.4              | 1.87                    | 1.54     | 14.8              | ≤ 62        |
| Pb            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.30     | 2.00              | 1.65                    | 0.42     | 0.60              | ≤ 150       |
| Se            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | <0.63    | <0.63             | <0.63                   | 0.94     | <0.63             | ≤ 2.0       |
| Zn            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 10.1     | 67.2              | 25.6                    | 41.3     | 59.6              | ≤ 700       |

**Tableau 19 Caractéristiques initiales des mélanges utilisés lors des essais de compostage à petite échelle**

| Paramètres    | Unités                 | C1    | C2    | C3    | C4    | C5    | C6    |
|---------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teneur en eau | (% p p <sup>-1</sup> ) | 33.6  | 33.6  | 33.0  | 32.0  | 33.2  | 31.4  |
| Densité       | (g cm <sup>-3</sup> )  | 0.51  | 0.54  | 0.51  | 0.45  | 0.54  | 0.44  |
| Poids sec     | (kg)                   | 631   | 631   | 637   | 646   | 643   | 652   |
| SV            | (%)                    | 93.5  | 93.9  | 92.1  | 90.0  | 91.6  | 89.1  |
| pH            |                        | 4.4   | 4.9   | 5.1   | 5.3   | 5.0   | 5.5   |
| C             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 454   | 454   | 453   | 451   | 454   | 451   |
| N             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 19.5  | 19.5  | 20.3  | 23.9  | 19.7  | 24.7  |
| Rapport C/N   |                        | 23.3  | 23.3  | 22.3  | 18.9  | 23.1  | 18.3  |
| S             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 0.12  | 0.12  | 0.13  | 0.14  | 0.12  | 0.14  |
| P             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 1.75  | 1.75  | 1.88  | 2.15  | 1.79  | 2.29  |
| Ca            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 1.22  | 1.22  | 1.36  | 1.80  | 1.25  | 1.94  |
| Mg            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 1.73  | 1.73  | 1.98  | 2.94  | 1.79  | 3.20  |
| Na            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 1.33  | 1.33  | 1.30  | 0.18  | 1.34  | 0.15  |
| K             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 8.69  | 8.69  | 9.98  | 15.1  | 9.02  | 16.3  |
| Al            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 121   | 121   | 138   | 208   | 125   | 226   |
| As            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.41  | 0.41  | 0.44  | 0.54  | 0.41  | 0.57  |
| Cd            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.07  | 0.07  | 0.08  | 0.10  | 0.08  | 0.10  |
| Cr            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1.21  | 1.21  | 1.23  | 1.52  | 1.22  | 1.55  |
| Co            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.43  | 0.43  | 0.49  | 0.70  | <0.06 | 0.76  |
| Cu            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 16.7  | 16.7  | 17.8  | 23.4  | 17.0  | 24.6  |
| Fe            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 403   | 403   | 422   | 505   | 408   | 524   |
| Mn            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 19.0  | 19.0  | 21.4  | 30.4  | 19.6  | 32.8  |
| Mo            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | <0.39 | <0.39 | <0.39 | <0.39 | <0.39 | <0.39 |
| Ni            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 5.22  | 5.22  | 5.93  | 8.40  | 5.40  | 9.12  |
| Pb            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.54  | 0.54  | 0.56  | 0.66  | 0.55  | 0.68  |
| Se            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | <0.63 | <0.63 | <0.63 | <0.63 | <0.63 | <0.63 |
| Zn            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 31.0  | 31.0  | 33.6  | 34.8  | 31.7  | 37.4  |

Puisque les teneurs en métaux dans les intrants étaient inférieures à la norme nationale pour les composts de qualité AA, il est donc évident que les mélanges initiaux satisfaisaient également les valeurs prescrites.

### **5.3.2. Aspect général des composts**

Le Tableau 20 fournit quelques caractéristiques concernant l'aspect (couleur, texture, odeur) des composts au terme de la période de quatre mois de compostage. Il s'avère que le mélange et l'arrosage fréquent des tas de composts sont des pratiques importantes afin d'assurer la production d'un compost homogène et mature. En effet, la dégradation des différents intrants des composts C2 (brassage et arrosage aux deux semaines uniquement) et C5 (brassage aux deux semaines et arrosage au besoin) était incomplète après quatre mois et de mauvaises odeurs étaient constatées lors du brassage de ces tas. Les autres composts se sont avérés nettement plus homogènes, de couleur noire et ne dégageaient pas d'odeurs désagréables. De très beaux produits finaux ont ainsi été obtenus suite au compostage des mélanges d'intrants combinant l'ensemble des coproduits de Biscuits Leclerc (C1), ou encore, sans intrants de la famille Biscuits (C3) ou de la famille Céréales (C4) ou sans intrants provenant des familles Biscuits et Céréales (C6).

La présence des écaillés de cacao est très importante, car elle permet de favoriser l'aération des composts et, ainsi, la dégradation complète de la matière organique (production de dioxyde de carbone) sans accumulation importante de molécules odorantes, telles que les acides gras volatils (ex. acétate, butyrate, propionate, lactate, etc.), les sulfures (sulfure

d'hydrogène, mercaptans, etc.), les amines (méthylamine, éthylamine, diméthylamine, etc.), les aldéhydes et les cétones (Stuetz et Frechen, 2001).

**Tableau 20 Aspect des composts au terme de la période de compostage en piles**

| <b>Composts</b> | <b>Caractéristiques</b>   |
|-----------------|---|
| C1              | Couleur noire<br>Les intrants ne sont plus identifiables<br>Odeur agréable<br>Tas beaucoup plus petit qu'au départ  |
| C2              | Couleur grisâtre<br>Plusieurs intrants encore identifiables (riz, gaufrettes...)<br>Présence de gros amas de matières non-dégradées<br>Odeur désagréable lorsqu'on brasse la matière non compostée souvent collée à la membrane de polyéthylène entre le sol et le tas                      |
| C3              | Couleur noire<br>Présence d'un peu d'intrants non compostés<br>Tas plus gros qu'en C1<br>Odeur généralement agréable  |
| C4              | Couleur noire<br>Tas assez gros<br>Les intrants ne sont plus identifiables<br>Odeur agréable  |
| C5              | Quelques intrants encore identifiables<br>Couleur noire légèrement moins foncée que les autres tas<br>Présence de gros amas de matières non-dégradées<br>Odeur désagréable lorsqu'on brasse de la matière non compostée souvent collée à la membrane de polyéthylène entre le sol et le tas |
| C6              | Couleur noire<br>Tas encore très gros<br>Les intrants ne sont plus identifiables<br>Odeur agréable  |

### 5.3.3. Perte de masse lors du compostage

Le Tableau 21 montre les données relatives à la perte de matière sèche suite au processus de compostage. Une diminution des solides variant entre 50 et 73% a été mesurée selon les tas de compost. Les baisses de solides les plus faibles ont été obtenues dans les cas des tas comprenant une forte proportion d'écaillés de cacao (84% et 91% de la masse sèche respectivement pour C4 et C6), lesquelles présentent sans doute une proportion plus élevée de matières peu biodégradables par rapport aux intrants des familles Biscuits ou Céréales (47% de la masse sèche en écaillés de cacao en moyenne pour C1, C2 et C5).

Redgwell *et al.* (2003) ont montré que les polysaccharides des écaillés de cacao sont constitués d'environ 45% de polysaccharides pectiques (mélange de rhamnogalacturonans), de près de 20% d'hémicelluloses (mélange de xyloglucans fucosylés, galactoglucomannans et glucoronoarabinoxylan) et 35% de cellulose. La nature complexe et moins biodégradable des polysaccharides des écaillés de cacao expliquerait donc que la perte de masse pour les tas de compost comprenant une proportion plus élevée d'écaillés, soit moins élevée que la réduction des solides dans le cas des composts avec plus de céréales et de résidus de biscuits.

Il faut également souligner que des pertes de masse légèrement moins importantes que pour C1, soient 67 et 70%, ont été mesurées dans les cas des tas (C2 et C5) subissant un brassage moins fréquent. Ceci démontre que le processus de compostage se déroule généralement bien, mais que la biodégradation est plus lente dans certaines zones des tas (principalement à la base des tas), ce qui fait en sorte que les composts finaux contiennent encore des particules de biscuits ou céréales incomplètement dégradées. La perte de masse

**Tableau 21 Caractéristiques physico-chimiques finales des composts**

| Paramètres     | Unités                 | C1   | C2   | C3   | C4    | C5    | C6    | Compost de déchets alimentaires | Compost de déchets municipaux |
|----------------|------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|---------------------------------|-------------------------------|
| Teneur en eau  | (% p p <sup>-1</sup> ) | 59.8 | 52.0 | 53.3 | 55.3  | 59.9  | 57.2  | 19.1 - 72.7                     | 29.6 – 51.7                   |
| Densité        | (g cm <sup>-3</sup> )  | 0.42 | 0.35 | 0.40 | 0.37  | 0.45  | 0.39  | 0.36 - 0.72                     | 0.22 – 0.74                   |
| Poids sec      | (kg)                   | 170  | 208  | 196  | 285   | 192   | 329   | -                               | -                             |
| Perte de masse | (% p p <sup>-1</sup> ) | 73.1 | 67.0 | 69.2 | 55.9  | 70.1  | 49.5  | -                               | -                             |
| SV             | (%)                    | 81.2 | 83.4 | 72.7 | 74.9  | 82.0  | 78.1  | -                               | -                             |
| pH             |                        | 7.3  | 8.3  | 7.7  | 7.9   | 7.7   | 7.4   | 6.1 - 7.0                       | 7.3 – 8.1                     |
| C              | (g kg <sup>-1</sup> )  | 409  | 446  | 450  | 478   | 462   | 466   | 437 - 469                       | 156 – 395                     |
| N              | (g kg <sup>-1</sup> )  | 64.4 | 58.3 | 62.8 | 53.9  | 64.8  | 49.1  | 7.0 - 12.7                      | 5.1 – 17.8                    |
| Rapport C/N    |                        | 6.35 | 7.64 | 7.17 | 8.87  | 7.12  | 9.49  | 35.1 – 65.4                     | -                             |
| S              | (g kg <sup>-1</sup> )  | 4.60 | 5.00 | 5.20 | 5.10  | 5.40  | 3.80  | 0.06 – 0.39                     | 0.5 – 6.0                     |
| P              | (g kg <sup>-1</sup> )  | 6.79 | 5.87 | 6.43 | 6.34  | 6.83  | 4.97  | 1.3 – 2.7                       | 1.5 – 6.6                     |
| Ca             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 8.20 | 6.09 | 6.95 | 5.56  | 7.86  | 6.54  | 5.7 - 19.5                      | 12 – 75                       |
| Mg             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 7.52 | 6.42 | 7.62 | 8.07  | 7.54  | 7.91  | 0.8 – 2.3                       | 1.7 – 6.0                     |
| Na             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 7.52 | 6.60 | 6.43 | 1.04  | 7.16  | 0.66  | 0.6 - 7.1                       | 2.0 – 7.1                     |
| K              | (g kg <sup>-1</sup> )  | 36.0 | 34.6 | 39.7 | 45.7  | 37.3  | 39.8  | 2.9 - 6.8                       | 0.7 – 9.7                     |
| Al             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 615  | 446  | 591  | 622   | 533   | 624   | 500                             | 9100 – 18400                  |
| As             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.40 | 0.50 | 0.29 | <0.28 | 0.34  | <0.28 | 0.9 - 4.0                       | 3.5 – 15.6                    |
| Cd             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.24 | 0.19 | 0.24 | 0.23  | 0.23  | 1.62  | <1                              | 0.04 – 100                    |
| Cr             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 3.05 | 2.04 | 3.07 | 3.11  | 2.64  | 6.61  | 0.1 – 8.0                       | 2 – 270                       |
| Co             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1.51 | 1.28 | 1.61 | 1.72  | 1.57  | 3.62  | -                               | -                             |
| Cu             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 48.1 | 39.1 | 47.6 | 49.1  | 48.5  | 51.2  | 23.0 - 36.4                     | 89.6 – 762                    |
| Fe             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1670 | 1190 | 1600 | 1360  | 1520  | 1340  | 800 - 8700                      | 2200 – 34900                  |
| Hg             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04  | 0.04  | 0.06  | -                               | -                             |
| Mn             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 103  | 83.4 | 101  | 93.6  | 98.7  | 98.4  | 52.6                            | 211 – 936                     |
| Mo             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1.41 | 0.96 | 1.03 | 0.59  | 1.19  | 0.57  | 1.0                             | 4.7 – 12.8                    |
| Ni             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 21.6 | 17.9 | 22.7 | 25.1  | 19.7  | 25.8  | 4.0 – 6.0                       | 0.76 – 190                    |
| Pb             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1.74 | 1.50 | 1.83 | 2.14  | 1.68  | 4.65  | 6.0 - 24.1                      | 9 – 900                       |
| Se             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1.02 | 0.93 | 0.74 | 0.76  | <0.63 | <0.63 | 0.5 – 3.0                       | 1.1 – 3.6                     |
| Zn             | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 104  | 86.4 | 101  | 97.8  | 102.2 | 95.0  | 37.6 – 90.0                     | 320 – 2790                    |

plus élevée dans le cas de C5 (70%) en comparaison avec C2 (67%) serait attribuable au maintien d'une teneur en eau moyenne plus élevée dans C5 ( $48 \pm 9\%$  humidité) que dans C2 ( $40 \pm 10\%$  humidité) tout au long de la période de compostage.

Les Tableaux 19 et 21 montrent aussi la diminution de la fraction volatile (perte de la matière organique par volatilisation à  $650^{\circ}\text{C}$ ) des matières sèches entre le début (valeurs comprises entre 89 et 94%) et la fin de la période de compostage (valeurs se situant entre 73 et 83%). La baisse de la fraction volatile s'explique par la diminution de la matière organique par biodégradation, alors que la fraction fixe (non volatile) demeure relativement stable durant le processus de compostage.

La densité en vrac des composts finaux était comprise entre  $0.35$  et  $0.45 \text{ g cm}^{-3}$ , alors que les mélanges initiaux (avant compostage) présentaient une densité se situant entre  $0.44$  et  $0.54 \text{ g cm}^{-3}$ . Ce fait démontre que le processus de compostage n'a pas causé une compaction importante des matières solides et que les produits finaux sont demeurés légers et poreux.

#### **5.3.4. Taux d'humidité**

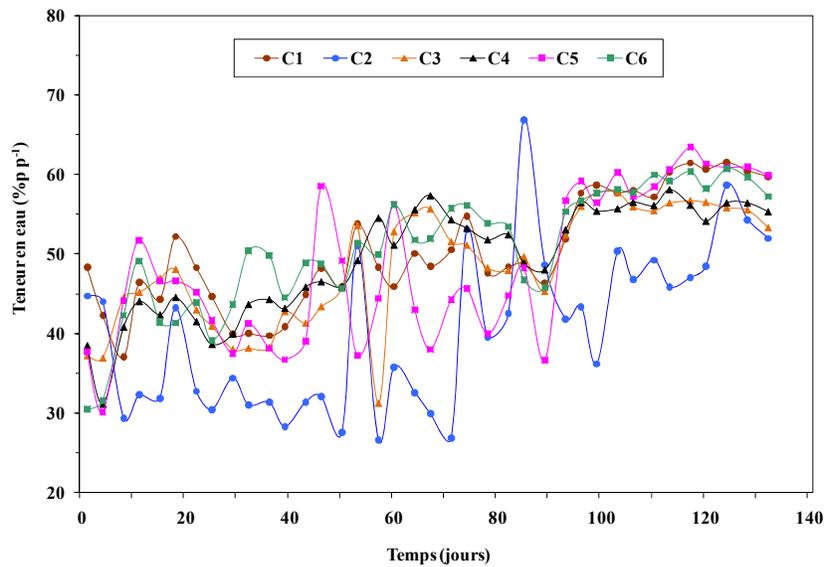
Deux fois par semaine, des mesures du taux d'humidité ont été effectuées afin de s'assurer que les composts étaient suffisamment humides pour maintenir l'activité biologique. Les teneurs moyennes, minimales et maximales en eau mesurées dans les composts sont indiquées au Tableau 22.

**Tableau 22 Mesures du taux d'humidité des composts et volumes totaux d'eau ajoutés lors des essais de compostage en piles**

| Composts | Volume d'eau ajouté<br>(L) | Teneur en eau (% p p <sup>-1</sup> ) |         |         |
|----------|----------------------------|--------------------------------------|---------|---------|
|          |                            | Moyenne ± $\sigma$                   | Minimum | Maximum |
| C1       | 2 000                      | 50.3 ± 7.0                           | 37.0    | 61.5    |
| C2       | 1 625                      | 40.3 ± 10.1                          | 26.6    | 67.0    |
| C3       | 2 312                      | 48.4 ± 7.4                           | 31.2    | 57.7    |
| C4       | 2 415                      | 49.4 ± 6.8                           | 31.1    | 58.1    |
| C5       | 2 173                      | 48.3 ± 9.5                           | 30.1    | 63.5    |
| C6       | 2 290                      | 50.6 ± 7.8                           | 29.9    | 60.8    |

La Figure 27 montre, quant à elle, l'évolution de la teneur en eau dans les composts au cours de la période de compostage. Les teneurs en eau dans les composts finaux se situaient entre 52 (C2) et 60% (C1 et C5).

Des volumes appréciables d'eau (1 625 à 2 415 L selon les tas, voir Tableau 22) ont dû être ajoutés au cours de la période de compostage, pour maintenir l'humidité à un niveau adéquat dans les tas de compost. Une teneur moyenne d'humidité se situant entre 48 et 51% a été maintenue dans les différents tas de compost (arrosage deux fois par semaine au besoin), à l'exception d'une valeur moyenne de 40% d'eau dans le cas du compost C2 (arrosage une fois par deux semaines seulement).

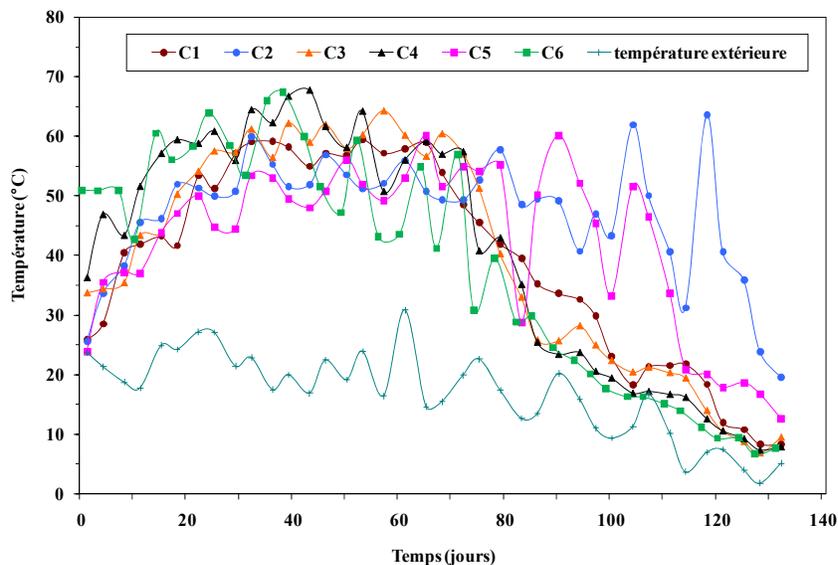


**Figure 27** Évolution temporelle de la teneur en eau (humidité) dans les composts lors des essais de compostage à petite échelle

### 5.3.5. Évolution de la température

La Figure 28 illustre la température interne des tas de compost au cours de la période de compostage. De manière générale, une hausse progressive de la température a été constatée au cours des deux ou trois premières semaines de compostage. Des températures élevées, soit supérieures à 50°C, se sont ensuite maintenues pendant des périodes s'étalant entre 6 et 10 semaines, puis les températures ont progressivement baissé jusqu'à des températures s'approchant de la température extérieure. Des températures finales inférieures à 10°C (7.8 à 9.6°C) ont été mesurées dans le cas des tas C1, C3, C4 et C6, alors que celles des tas C2 et C5 étaient respectivement de 19.7 et 12.7°C. Les températures finales plus élevées pour C5 et, surtout pour C2, témoignent du processus incomplet de compostage dans ces deux cas. Une

hausse particulièrement rapide de la température ( $T > 50^{\circ}\text{C}$  après 24 h) a été dénotée dans le cas du compost C6, lequel est constituée uniquement d'écailles de cacao et de boues. La température la plus élevée, soit  $68^{\circ}\text{C}$ , a été mesurée dans le cas des tas C4 et C6.

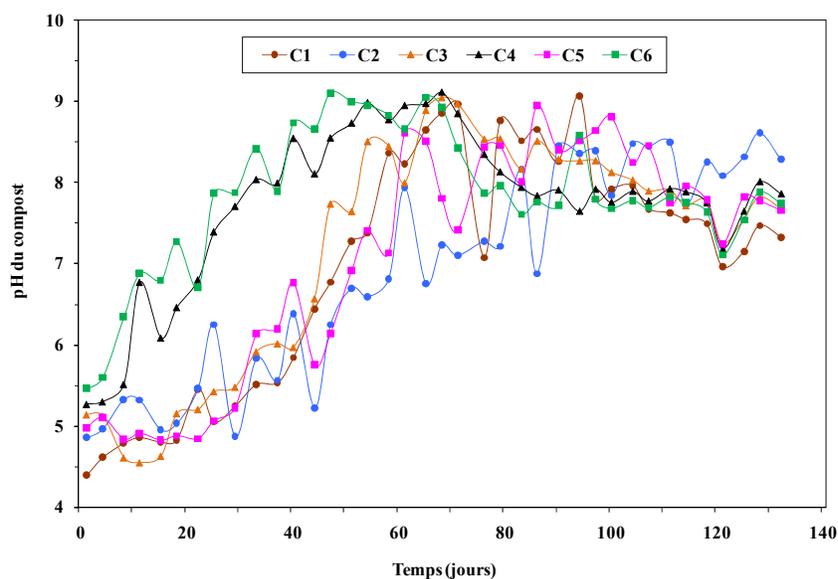


**Figure 28** Évolution temporelle de la température interne et externe des composts lors des essais de compostage à petite échelle

### 5.3.6. Évolution du pH des composts

La Figure 29 illustre la fluctuation du pH des composts au cours de la période de compostage à petite échelle. Une hausse progressive du pH a été mesurée durant les 7 à 10 premières semaines pour tous les composts, puis celui-ci s'est stabilisé avec des valeurs finales comprises entre 7.3 (C1) et 8.3 (C2) (Tableau 21). La hausse la plus rapide du pH a été notée dans le cas des composts (C4 et C6) possédant les proportions les plus élevées en écailles de cacao. Il faut

souligner que les mélanges initiaux d'intrants étaient tous légèrement acides avec des valeurs se situant entre 4.4 (C1) et 5.5 (C6) (Tableau 19). La hausse du pH des composts peut s'expliquer notamment par la dégradation de composés azotés engendrant la libération d'ammoniac qui, en se solubilisant, fait augmenter le pH (Sanchez-Monedero *et al.*, 2001).



**Figure 29** Évolution temporelle du pH des composts lors des essais de compostage à petite échelle

### 5.3.7. Carbone, azote et rapport C/N

Les teneurs en carbone et azote, ainsi que le rapport C/N des composts obtenus après quatre mois de compostage à petite échelle sont exposés au Tableau 21. Les données montrent notamment des valeurs de rapport C/N faibles (6.4 à 9.5) résultant du processus de compostage. Cette baisse du rapport C/N s'explique par la hausse des teneurs en azote total (concentrations finales

comprises entre 49.1 et 64.8 g kg<sup>-1</sup>) résultant de la baisse importante des matières solides. Les teneurs en azote dans les composts finaux ont ainsi augmenté par un facteur 2.0 à 3.3 par rapport aux teneurs en azote mesurées dans les mélanges initiaux.

Le bilan de masse de l'azote total (masse initiale d'azote/masse finale d'azote) dans chaque tas indique que les quantités totales d'azote demeurent pratiquement inchangées, avec des variations s'étalant entre -12.4% et +0.3%. Ce bilan confirme le fait que la baisse du rapport C/N s'explique principalement par la diminution de la fraction carbonée des mélanges de compost.

Les teneurs en carbone des composts (409 à 478 g kg<sup>-1</sup>) sont comparables à ce qui a été décrit par He *et al.* (1995) et Epstein *et al.* (2005) pour du compost provenant de déchets alimentaires (C = 437 à 469 g kg<sup>-1</sup>) et sont supérieures à la teneur usuelle en carbone (156 à 395 g kg<sup>-1</sup>) dans les composts de déchets municipaux (He *et al.*, 1992, 1995; Tisdell et Breslin, 1995).

Le Tableau 21 montre également les caractéristiques physico-chimiques de composts produits à partir de déchets alimentaires (He *et al.*, 1995; Epstein *et al.*, 2005) et de plusieurs composts générés à partir de déchets municipaux (He *et al.*, 1992, 1995; Tisdell et Breslin, 1995). Ainsi, les teneurs finales en azote des composts (49.1 à 64.8 g kg<sup>-1</sup>) produits dans cette étude sont nettement supérieures aux teneurs mesurées dans le compost de déchets alimentaires (7.0 à 12.7 g kg<sup>-1</sup>), ou encore, dans les composts de déchets municipaux (5.1 à 17.8 g kg<sup>-1</sup>). Les teneurs élevées en azote constituent une caractéristique agronomique particulièrement intéressante des composts produits dans cette étude et résultent, en bonne partie, de l'utilisation des écales de cacao, dont la teneur initiale en azote est de 25.9 g kg<sup>-1</sup>.

### 5.3.8. Éléments nutritifs et métaux

Les teneurs en éléments nutritifs et en métaux des composts obtenus après quatre mois de compostage à petite échelle sont exposées au Tableau 21. De manière semblable à l'azote, le processus de compostage a fait en sorte de concentrer les éléments nutritifs (S, P, Ca, Mg, Na et K) dans les composts. Les pertes par lessivage des nutriments et des métaux ont sans doute été négligeables puisque les tas de compost étaient protégés des précipitations et que très peu de lixiviats s'écoulaient des tas lors des arrosages périodiques.

Les teneurs en P, K, Mg et S mesurées dans les composts finaux sont supérieures à ce qui a été répertorié dans la littérature pour des composts préparés à partir de déchets alimentaires, mais sont dans la limite inférieure en ce qui concerne les teneurs en Ca (5.6 à 8.2 g kg<sup>-1</sup>). Les teneurs mesurées en Na (0.7 à 7.5 g kg<sup>-1</sup>) sont comparables.

En comparaison aux composts générés à partir de déchets municipaux, les teneurs mesurées en K (34.6 à 45.7 g kg<sup>-1</sup>) sont supérieures, alors que celles mesurées pour le Ca sont inférieures. Les autres nutriments sont comparables aux teneurs répertoriées dans la littérature.

Les résultats du Tableau 21 montrent également que les teneurs en métaux dans les composts, malgré le phénomène de concentration causé par le processus de compostage, sont demeurées nettement inférieures aux exigences en vigueur pour la production de compost de qualité AA et ce, pour tous les métaux.

Les teneurs en Ni, Mn et Zn déterminées dans les composts sont supérieures à ce qui a été répertorié pour des composts préparés à partir de déchets alimentaires, mais sont généralement inférieures en ce qui concerne les teneurs en As et Pb. Les teneurs des autres éléments métalliques sont comparables aux teneurs identifiées dans la littérature pour des composts de

déchets alimentaires. D'autre part, les teneurs en métaux dans les composts s'avèrent généralement inférieures aux teneurs mesurées pour des composts préparés à partir de déchets municipaux.

### **5.3.9. Tests de maturité des composts**

Différents tests standardisés ont été menés afin de vérifier l'état de stabilité (maturité) des composts au terme de la période de compostage de quatre mois. Le Tableau 23 montre les principales données issues de ces tests, ainsi que l'interprétation donnée par les guides techniques à partir des résultats obtenus. Selon l'information disponible, les composts C1, C3, C4, C5 et C6 seraient très matures, alors que selon le test de production de CO<sub>2</sub> (*Solvita carbon dioxide test*) le compost C2 nécessiterait encore une période d'incubation.

Dans la présente étude, il ressort toutefois que la maturité incomplète du compost C2 ait été révélée seulement par le test de production de CO<sub>2</sub> alors que cette maturité incomplète était visuellement évidente. Ce fait témoigne de l'importance d'utiliser plusieurs tests, et non seulement un test, pour juger de la qualité de stabilisation des composts.

**Tableau 23 Tests de maturité des composts au terme de la période de compostage à petite échelle de quatre mois**

| <b>Composts</b> | <b><math>\Delta</math> Temp. *</b><br><b>(°C)</b> | <b>CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> **</b><br><b>(%)</b> | <b>NH<sub>3</sub> †</b><br><b>(ppm 4 h<sup>-1</sup>)</b> | <b>Signification</b>   |
|-----------------|---|--|--|--|
| C1              | 0-5   | ≤ 0.2  | < 100  | Compost inactif, hautement mature, comme le sol, sans limitation d'usage               |
| C2              | 0-5   | 2.0  | < 100  | Compost actif prêt pour le "séchage" (curing), besoin de brassage beaucoup moins grand |
| C3              | 0-5   | ≤ 0.2  | < 100  | Compost inactif, hautement mature, comme le sol, sans limitation d'usage               |
| C4              | 0-5   | ≤ 0.2  | < 100  | Compost inactif, hautement mature, comme le sol, sans limitation d'usage               |
| C5              | 0-5   | ≤ 0.2  | < 100  | Compost inactif, hautement mature, comme le sol, sans limitation d'usage               |
| C6              | 0-5   | ≤ 0.2  | < 100  | Compost inactif, hautement mature, comme le sol, sans limitation d'usage               |

\* Test d'augmentation de la température (Dewar Self-Heating Test).

\*\* Solvita Carbon Dioxide Test.

† Solvita Ammonia Test.

### 5.3.10. Mesures microbiologiques

Le Tableau 24 fournit les données relatives au dénombrement des coliformes fécaux, des bactéries hétérotrophes totales (BHAA) et des salmonelles dans les échantillons de compost au terme de la période de compostage en tas de quatre mois

Les résultats démontrent que les composts C1, C3, C4 et C6 répondent aisément aux critères microbiologiques exigés pour le compost de catégorie AA. Par contre, les composts C2 et C5 (tas moins agités) dépassent le seuil en ce qui concerne les teneurs en coliformes fécaux.

**Tableau 24 Dénombrement des coliformes fécaux, des BHAA et des salmonelles dans les composts au terme de la période de compostage à petite échelle de quatre mois**

| <b>Composts</b>            | <b>Coliformes fécaux<br/>NPP gps<sup>-1</sup></b> | <b>Salmonelles<br/>(10 g humide<sup>-1</sup>)</b> | <b>BHAA<br/>(UFC g<sup>-1</sup>)</b> |
|----------------------------|---|---|--------------------------------------|
| C1                         | 50  | absence   | > 3 x 10 <sup>8</sup>                |
| C2                         | 1600  | absence   | > 3 x 10 <sup>8</sup>                |
| C3                         | 9   | absence   | 2.1 x 10 <sup>8</sup>                |
| C4                         | < 5   | absence   | > 3 x 10 <sup>8</sup>                |
| C5                         | 6200  | absence   | 1.7 x 10 <sup>8</sup>                |
| C6                         | 21  | absence   | > 3 x 10 <sup>8</sup>                |
| <i>Normes (compost AA)</i> | <i>&lt; 1000</i>                                  | <i>&lt; 3 NPP 4 gps<sup>-1</sup></i>              | <i>-</i>                             |

Lors du processus de compostage, les coliformes fécaux et salmonelles sont normalement éliminés durant la phase thermophile (hausse de la température à >55°C) du compostage (Hassen *et al.*, 2001; Epstein *et al.*, 2005; Shammass et Wang, 2007). Dans le cas des composts C2 et C5, les températures maximales atteintes ont été respectivement de 64 et 60°C, ce qui aurait dû, en principe, permettre une bonne aseptisation de ces composts. Il faut cependant noter que ces composts ont été moins agités que les autres composts et que, en conséquence, des zones moins chaudes ont probablement été formées, ce qui pourrait expliquer une moins bonne qualité de désinfection dans ces cas.

## **5.4. ESSAIS DE COMPOSTAGE À GRANDE ÉCHELLE**

### **5.4.1. Composition initiale et finale des mélanges de compostage**

Les caractéristiques initiales et finales des mélanges d'intrants utilisés lors des essais de compostage à grande échelle sont présentées au Tableau 25. Comme pour les essais à petite échelle, les valeurs initiales ont été calculées en considérant les proportions relatives de chaque famille d'intrant.

Les intrants ont été apportés graduellement au lieu de compostage sur une période d'environ 20 jours. Ainsi, le temps pluvieux a permis d'éviter d'avoir à humidifier le mélange. Pour cette raison, l'humidité réelle au jour 1 est supérieure à la teneur en eau mentionnée au Tableau 25. Les autres paramètres du Tableau 25 seront discutés dans les sections suivantes.

### **5.4.2. Aspect général des composts**

Au terme de la période d'étude, les composts T1 et T2 paraissaient mûres en surface. Par contre, lors des brassages, il était apparent que les intrants du compost T1 n'étaient pas totalement décomposés. Après la même période de temps, le compost à petite échelle C1 était mûre. Il semble que les brassages deux fois moins fréquents augmentent le temps permettant à un compost de devenir mûre.

**Tableau 25** Caractéristiques initiales et finales des mélanges utilisés lors des essais de compostage à grande échelle

| Paramètres    | Unités                 | Initiales |       | Finales |       |
|---------------|------------------------|-----------|-------|---------|-------|
|               |                        | T1        | T2    | T1      | T2    |
| Teneur en eau | (% p p <sup>-1</sup> ) | 20.5      | 16.0  | 50.2    | 56.7  |
| SV            | (%)                    | 61.5*     | 76.1* | 30.1    | 32.4  |
| pH            |                        | 4.28*     | 6.48* | 8.56    | 8.03  |
| C             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 430       | 434   | 99      | 130   |
| N             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 20.6      | 25.0  | 11.0    | 14.7  |
| Rapport C/N   |                        | 20.9      | 17.4  | 9.00    | 8.84  |
| S             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 0.19      | 0.20  | 1.10    | 1.50  |
| P             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 3.07      | 3.65  | 2.50    | 2.70  |
| Ca            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 2.74      | 3.37  | 3.92    | 3.93  |
| Mg            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 3.17      | 5.08  | 3.08    | 4.23  |
| Na            | (g kg <sup>-1</sup> )  | 2.00      | 0.23  | 1.31    | 3.59  |
| K             | (g kg <sup>-1</sup> )  | 16.1      | 26.0  | 8.94    | 15.0  |
| Al            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 214       | 351   | 5600    | 4110  |
| As            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.74      | 0.87  | <0.42   | <0.42 |
| Cd            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.11      | 0.15  | <0.07   | <0.07 |
| Cr            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1.44      | 1.73  | 65.2    | 45.1  |
| Co            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.83      | 1.23  | 2.62    | 2.35  |
| Cu            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 24.0      | 32.0  | 29.7    | 28.0  |
| Fe            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 597       | 712   | 6690    | 6110  |
| Mn            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 36.7      | 53.1  | 84.9    | 83.0  |
| Mo            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.45      | 0.35  | <0.39   | <0.39 |
| Ni            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 8.75      | 14.1  | 32.2    | 25.9  |
| Pb            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 0.59      | 0.66  | 3.57    | 2.32  |
| Se            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | <0.63     | 0.24  | <0.63   | <0.63 |
| Zn            | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 46.7      | 57.7  | 53.6    | 58.6  |

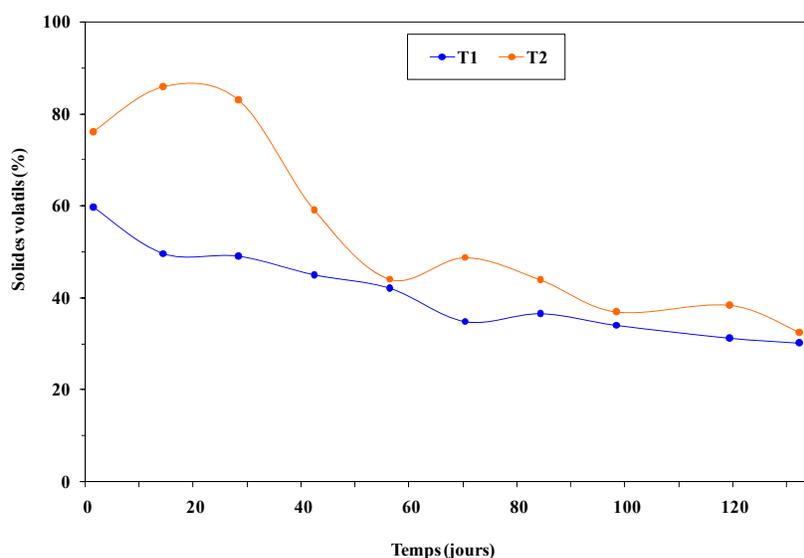
\* Résultats d'analyse des composts au jour 1.

### **5.4.3. Perte de masse lors du compostage (solides volatils)**

Il existe une forte relation inverse entre le temps écoulé et la diminution de la fraction volatile ( $R^2$  de 91.1% (T1) et de 82.3% (T2)) (Figure 30). Durant le compostage, la fraction biodégradable des solides volatils diminue jusqu'à l'atteinte d'une valeur stable. Normalement, ce qu'il reste à la fin du processus n'est pas biodégradable (Mulligan, 2002). Durant le compostage, la teneur en solides volatils est passée de 59.8 à 30.1% pour T1 et de 76.0 à 32.4% pour T2. Ceci est passablement différent de ce qui avait été observé avec les composts à petite échelle qui passait respectivement de 93.5 à 81.2% pour C1 et de 89.1 à 78.1% pour C6. Le délai de 20 jours permettant l'apport de l'ensemble des intrants sur le lieu du compostage a probablement permis de réduire la fraction volatile avant le jour 1. L'augmentation de la fraction volatile du compost T2 serait quant à elle explicable par l'apport des boues physico-chimiques au 18<sup>ème</sup> jour du compostage. Enfin, l'apport important et graduel de terre lors des brassages peut expliquer la plus grande diminution des solides volatils observés lors de ces essais.

### **5.4.4. Taux d'humidité**

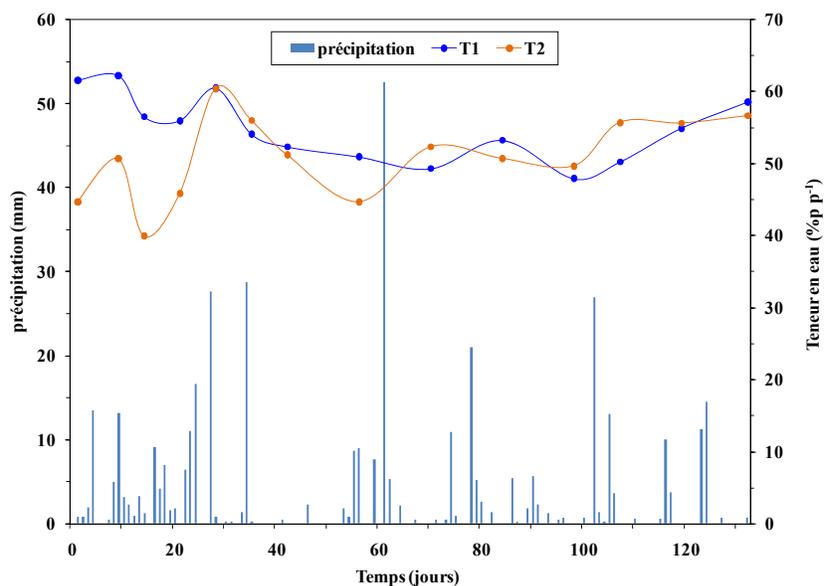
La teneur en eau a été mesurée à chaque semaine au début du processus, puis aux deux semaines par la suite afin de s'assurer que les composts étaient assez humides pour entretenir l'activité biologique. Les teneurs moyennes, minimales et maximales en eau mesurées dans les composts sont indiquées au Tableau 26. L'évolution de la teneur en eau des composts et les précipitations tombées durant le processus de compostage sont présentées à la Figure 31. Les données météorologiques proviennent de l'aéroport Jean-Lesage à Québec soit à environ 10 km du lieu de compostage.



**Figure 30** Évolution temporelle de la teneur en solides volatils lors des essais de compostage à grande échelle

**Tableau 26** Mesures du taux d'humidité des composts lors des essais de compostage à grande échelle

| Composts | Teneur en eau (% p p <sup>-1</sup> ) |         |         |
|----------|--------------------------------------|---------|---------|
|          | Moyenne ± $\sigma$                   | Minimum | Maximum |
| T1       | 47.5 ± 3.7                           | 42.2    | 53.3    |
| T2       | 51.1 ± 5.9                           | 39.9    | 60.4    |



**Figure 31 Évolution temporelle de la teneur en eau (humidité) dans les composts lors des essais de compostage à grande échelle**

Tel que mentionné précédemment, les intrants ont été apportés graduellement au lieu de compostage sur une période d'environ 20 jours. Ainsi, le temps pluvieux a permis d'éviter d'avoir à humidifier le mélange au départ. Comme la période de compostage a été assez pluvieuse, un total des 403 mm de pluie, aucun apport d'eau n'a été nécessaire. Le taux moyen d'humidité a ainsi été de 48 et 51% pour T1 et T2 respectivement. Par contre, l'accumulation de lixiviat à proximité des tas dégageait des odeurs nauséabondes et était un facteur limitant pour effectuer les brassages à intervalle régulier à cause des risques enlisements. De manière générale, le taux d'humidité des composts suivait les précipitations à l'exception du compost T2 en début du processus. Ceci est due au fait que les boues physico-chimiques n'ont pu être ajoutées dans la pile T2 avant le 18<sup>ème</sup> jour à cause de contraintes techniques. Suite à cet ajout, le taux d'humidité

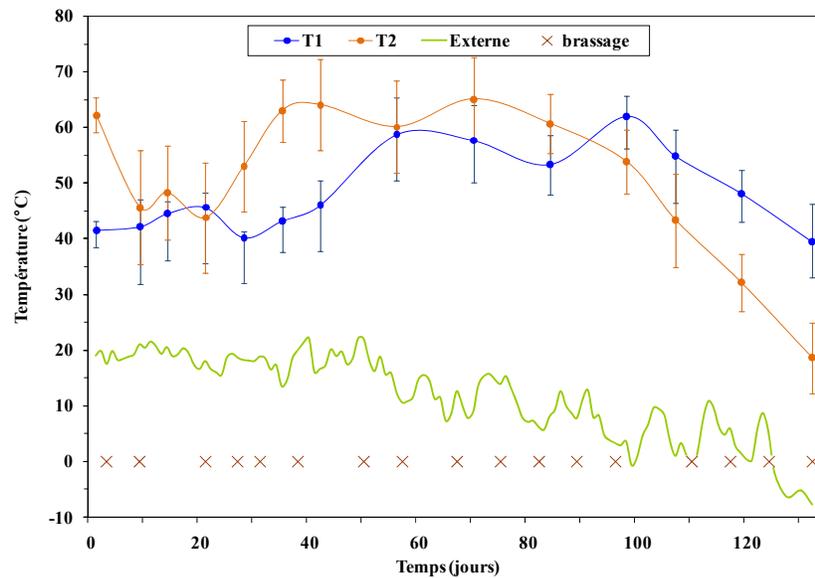
est remonté et s'est rapproché de celui observé dans la pile T1. Les teneurs finales en humidité ont été de 50 et 57% pour T1 et T2 respectivement.

#### **5.4.5. Évolution de la température**

Les températures internes des composts T1 et T2 ainsi que la température extérieure durant le processus de compostage et les jours de brassage sont présentées à la Figure 32. Tout comme pour les essais à petites échelles, des hausses de température ont été observées en premier lieu. Celles-ci se sont toutefois étalées sur une plus longue période soit 10 à 14 semaines. Néanmoins, les températures maximales atteintes ont été similaires: 61.9 et 65.1°C pour T1 et T2 respectivement. Une aération moins fréquente semble avoir ralenti le processus de dégradation puisqu'un retard d'environ 35 et 45 jours dans l'atteinte des températures maximales a été observé par rapport aux essais à petites échelles. Toutefois, des températures supérieures à 50°C ont été maintenues pendant environ 7 et 10 semaines pour les composts T1 et T2 ce qui correspond à ce qui avait été observé dans les composts à petites échelles.

Avant le 18<sup>ème</sup> jour de compostage, des baisses de températures ont été enregistrées dans la pile T2. Comme pour le taux d'humidité, l'ajout des boues physico-chimiques a eu un effet positif sur la température. Effectivement, ce réajustement du rapport C/N a eu pour conséquence d'augmenter les températures enregistrées.

Les températures finales (jour 132) ont été de 39.4°C et de 18.6°C pour T1 et T2 respectivement. Ces températures finales sont plus élevées que pour les composts à petite échelle. Ceci indique que le processus n'est pas terminé dans le cas du compost T1.



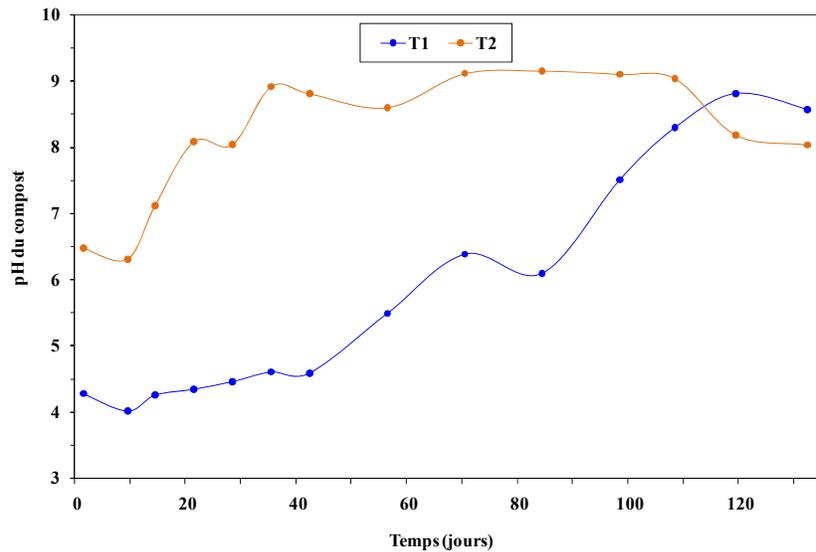
**Figure 32** Évolution temporelle de la température interne et externe des composts et jours de brassage des essais de compostage à grande échelle

#### 5.4.6. Évolution du pH des composts

L'évolution du pH des composts à grande échelle est présentée à la Figure 33. En début de processus, le pH a augmenté progressivement pour atteindre un pH final de 8.6 dans le cas de T1. Pour le compost T2, le pH a par la suite légèrement redescendu à 8.0. Le pH final de T1 a été plus élevé que lors des essais à petite échelle (il était de 7.3) probablement parce que le processus n'était pas encore totalement achevé. Le pH final du compost T2 est quant à lui comparable à celui des essais à petites échelles (pH de 7.7).

Les premiers pics de pH maximaux ont été atteints plus tard que ceux des essais à petite échelle. Dans le cas du compost T2, le retard est d'environ 25 jours et d'environ 50 jours pour T1. Ces retards corroborent avec ceux observés dans les variations de températures. Les pH maximaux

ont été de 8.8 et de 9.2 pour T1 et T2 respectivement. Le pH maximal de T2 est similaire à ce qui avait été observé lors des essais de compostage à petite échelle. Par contre, le pH maximal de T1 a quant à lui été plus faible (8.3) que lors des premiers essais (9.1) probablement parce que le processus n'était pas terminé.

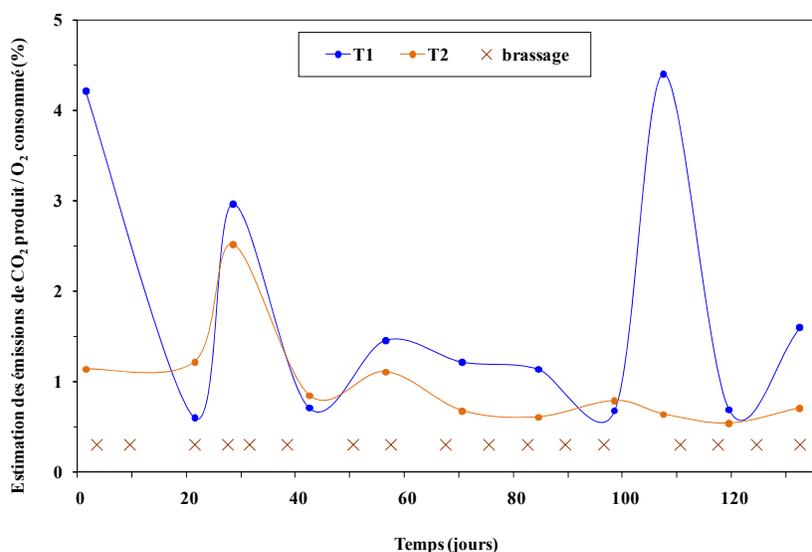


**Figure 33** Évolution temporelle du pH des composts lors des essais de compostage à grande échelle

#### 5.4.7. Évolution de la production de CO<sub>2</sub>

L'évolution temporelle de l'émission du CO<sub>2</sub> est présentée à la Figure 34. Dans le cas du compost T1, le taux d'émission de CO<sub>2</sub> a été assez variable. Par contre, le compost T2 suit la tendance généralement observée en compostage. Normalement, le taux de respiration augmente rapidement au début du compostage, puis décroît graduellement et se stabilise environ aux

mêmes valeurs (Komilis, 2006; Paillat *et al.*, 2005; Eklind *et al.*, 2007). Cette évolution est une conséquence du fait que le taux de production de CO<sub>2</sub> est directement lié à la vitesse de dégradation des différents composés présents dans le mélange à composter (Komilis, 2006).



**Figure 34** Évolution temporelle de l'estimation des émissions de CO<sub>2</sub> lors des essais de compostage à grande échelle

L'ajout des boues seulement au 18<sup>ème</sup> jour pour T2 a eu pour effet d'augmenter l'émission de CO<sub>2</sub> plus tard qu'au tout début du processus. Les émissions de CO<sub>2</sub> ont par la suite rapidement diminué étant donnée la forte proportion d'écaillés de cacao dans le mélange. Celles-ci contiennent des éléments comme la cellulose et l'hémicellulose qui se dégradent plus lentement et qui ne sont pratiquement pas responsables de la production de CO<sub>2</sub> (Komilis, 2006).

Le compost T1 suit peu les tendances normalement retrouvées en compostage. Des pics d'émission de CO<sub>2</sub> ont été observés aux jours 1, 28 et 107. Le pic du jour 28 correspond au début du taux de décomposition maximal constaté par l'augmentation de température. Dans les études de Komilis (2006) et de Lu *et al.* (2008), le taux de CO<sub>2</sub> est directement proportionnel à la température. Alors, il est sensé d'observé un pic d'émissions de CO<sub>2</sub> au jour 28. Le pic du jour 107 pourrait être expliqué par un taux d'aération non optimal. Par ailleurs, la littérature n'est pas unanime en ce qui a trait à l'efficacité du test de Solvita® Selon Adani *et al.* (2002) et Changa *et al.* (2003) ce test a une faible résolution. À l'opposé Cabanas-Vargas *et al.* (2005) considère le test Solvita® comme un bon indicateur de la maturité des composts. Toutefois, les sources s'entendent sur le fait que le test peut être utilisé pour les composts en fin de processus (Changa *et al.*, 2003).

Le compost T1 a produit plus de CO<sub>2</sub> que le compost T2 qui ne contenait pas de céréales ni de biscuits. Dans l'étude de Komilis (2006), les résidus de nourriture ont produit de plus grandes quantités de CO<sub>2</sub> que les autres substrats. Cette grande production de CO<sub>2</sub> est explicable par la forte teneur en carbone aqueux initial (Komilis, 2006).

#### **5.4.8. Carbone, azote et rapport C/N**

Comme pour les composts à petite échelle, une grande baisse du rapport C/N a eu lieu pendant le compostage passant de 20.9 à 9.0 pour T1 et de 17.4 à 8.8 pour T2 (Tableau 25). Cette baisse du rapport C/N est due à une réduction des matières solides. Lors des essais de compostage à petite échelle, les teneurs en carbone initiales et finales étaient restées sensiblement les mêmes tandis que les teneurs en azote avaient augmenté d'un facteur de 2.0 à 3.3 (C6 et C1) par rapport aux

teneurs initiales. Hors, les teneurs en carbone et en azote des composts T1 et T2 ont diminué. La teneur en carbone a diminué d'un facteur de 3.3 à 4.3 (T2 et T1) et la teneur en azote a diminué d'un facteur de 1.7 à 1.9 (T2 et T1). Ceci laisse supposer qu'il y aurait eu des pertes de carbone et d'azote sous une forme qui n'était pas présente lors des essais à petite échelle, soit par lixiviation essentiellement ou par « effet de dilution » par l'incorporation de terre lors des brassages. Ces deux éléments seront discutés dans la section 5.4.10.

Les teneurs finales en carbone de T1 et T2 sont très inférieures à celles des composts de déchets alimentaires (He *et al.*, 1995; Epstein *et al.*, 2005). Par rapport aux essais à petite échelle, la teneur finale en azote est près de six fois moins élevée pour T1 et près de trois fois moins élevée pour T2. Néanmoins, elles correspondent à celles des composts de déchets alimentaires et municipaux (He *et al.*, 1992, 1995; Tisdell et Breslin, 1995; Epstein *et al.*, 2005).

Le rapport C/N final de T1 est supérieur à celui de C1 (6.4) probablement car le processus de compostage n'est pas totalement complété. Le rapport C/N de T2 est, quant à lui, similaire à celui de C6. Ces rapports semblent très faibles soit trois fois moins élevés que ceux des composts de déchets alimentaires (C/N: 35.1-65.4) (He *et al.*, 1995; Epstein *et al.*, 2005).

#### **5.4.9. Éléments nutritifs et métaux**

Pour ce qui est des teneurs initiales de l'ensemble des autres éléments contenus dans les mélanges de composts, elles sont plus élevées que lors des essais à petite échelle. Normalement, le processus de compostage concentre les éléments contenus dans un mélange. Par exemple, lors des essais à petite échelle, les teneurs finales de C1 et C6 étaient en moyenne quatre fois supérieures aux teneurs initiales. Or, la majorité des éléments des composts T1 et T2 ont eu des

diminutions ou des stagnations de leur teneur lors du compostage. Les teneurs en aluminium, chrome et fer ont toutefois augmenté durant le processus si on les compare aux teneurs finales obtenues lors des essais à petite échelle (Tableau 27). Pour tous les éléments, à l'exception de l'Al, du Cr et du Fe, le processus de compostage n'a pas eu l'effet de concentrer autant les éléments que lors des essais de compostage à petite échelle. Ceci pourrait être expliqué par les pertes par lixiviation et, dans une moindre mesure, par la décomposition incomplète du mélange T1 et l'effet de « dilution » dû à l'apport de terre lors des brassages. Les pertes par lixiviation semblent particulièrement élevées pour le phosphore et le potassium dont les teneurs finales sont inférieures aux teneurs initiales. Les teneurs en éléments nutritifs et métaux du lixiviat sont présentés à la section 5.4.10.

**Tableau 27 Facteur de concentration des teneurs en aluminium, chrome et fer finales des composts à grande échelle par rapport à ceux à petite échelle**

|    | Facteurs de concentration |           |
|----|---------------------------|-----------|
|    | T1 p/r C1                 | T2 p/r C6 |
| Al | 9.1                       | 6.6       |
| Cr | 21.4                      | 6.8       |
| Fe | 4.0                       | 4.8       |

Même si les teneurs initiales en éléments nutritifs de T1 et T2 étaient plus concentrées que celles des essais à petite échelle, les teneurs finales sont globalement moins élevées que celles des composts à petite échelle. Ainsi, l'utilisation des composts T1 et T2 comme amendement seraient probablement moins bénéfique que celle des composts obtenus lors des essais à petite échelle.

Les teneurs finales en éléments nutritifs et traces sont généralement inférieures ou semblables aux composts de déchets municipaux présentés au Tableau 21 sauf pour le K qui possède une teneur plus élevée pour T2 (He *et al.*, 1992, 1995; Tisdell et Breslin, 1995). Ce sont les écailles de cacao qui sont très riches en cet élément (Tableau 17). De plus, les teneurs en métaux correspondent encore une fois à ce qui est exigé pour la production d'un compost de qualité AA.

#### **5.4.10. Lixiviat et incorporation de terre lors des brassages**

Contrairement aux essais à petite échelle, il est possible qu'il y ait eu des pertes des nutriments par lessivage. Les précipitations abondantes tombées sur les piles de compost ont occasionné à quelques reprises durant l'été l'accumulation de lixiviat près des tas. Les teneurs en métaux du lixiviat recueilli le 26 août sont présentés au Tableau 28.

La forte teneur en potassium du lixiviat concorde avec la teneur finale de cet élément inférieure à la teneur initiale. Les teneurs élevées en fer et en aluminium sont toutefois surprenante. Le lixiviat, chargé en matière organique et en métaux, a très probablement contaminé la rivière situé à une dizaine de mètres du lieu de compostage. De plus, lors des échantillonnages, plusieurs oiseaux ont été observés dans les mares de lixiviat. Ces deux facteurs permettent de fortement supposer que le lixiviat a eu un impact environnemental négatif. Par ailleurs, les habitants des maisons, non loin du site de compostage, ont pu être incommodés par les odeurs nauséabondes dégagées par les mares de lixiviat. Considérant l'ensemble de ces éléments et les *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage* (MDDEP, 2008) que suit le gouvernement dans l'émission des certificats d'autorisation, d'importantes modifications devront être apportées au site de compostage.

**Tableau 28** Caractéristiques du lixiviat recueilli le 26 août à proximité des piles de compost des essais à grande échelle

| Paramètres    | Unités                 | Lixiviat |
|---------------|------------------------|----------|
| Teneur en eau | (% p p <sup>-1</sup> ) | 97.0     |
| pH            |                        | 7.94     |
| C             | (g L <sup>-1</sup> )   | 170      |
| N             | (g L <sup>-1</sup> )   | 14.7     |
| S             | (g L <sup>-1</sup> )   | 1.7      |
| P             | (g L <sup>-1</sup> )   | 1.83     |
| Ca            | (g L <sup>-1</sup> )   | 1.72     |
| Mg            | (g L <sup>-1</sup> )   | 1.80     |
| Na            | (g L <sup>-1</sup> )   | 3.91     |
| K             | (g L <sup>-1</sup> )   | 45.4     |
| Al            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 1 020    |
| As            | (mg L <sup>-1</sup> )  | <0.01    |
| Cd            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 0.12     |
| Cr            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 1.54     |
| Co            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 0.42     |
| Cu            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 9.60     |
| Fe            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 382      |
| Mn            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 21.3     |
| Mo            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 0.21     |
| Ni            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 5.72     |
| Pb            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 0.52     |
| Se            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 1.53     |
| Zn            | (mg L <sup>-1</sup> )  | 21.2     |

Par ailleurs, l'absence de structure bétonnée supportant les essais de compostage à grande échelle a eu pour effet d'incorporer des quantités appréciables de terre aux mélanges. L'apport non négligeable de terre lors des brassages peut avoir eu l'effet de diminuer les teneurs en certains

éléments et d'augmenter les teneurs en aluminium, chrome et fer. Les quantités incorporées aux mélanges sont difficilement mesurables toutefois, l'analyse d'un échantillon du sol pourrait corroborer cette hypothèse. L'absence de structure bétonnée a également été contraignante pour effectuer les brassages avec la machinerie lourde suite à de fortes précipitations augmentant les risques d'enlèvement.

#### **5.4.11. Tests de maturité des composts**

Les tests standardisés de maturité utilisés pour les essais de compostage à petite échelle ont également permis d'évaluer la maturité des composts à grande échelle. Les tests de maturité ont été effectués au jour 107 afin de s'assurer de l'accès aux piles de compost avant les précipitations de neige. Ils sont présentés au Tableau 29. Selon ces tests, le compost T2 est mature et le compost T1 est prêt pour la phase de maturation. Par contre, le test d'augmentation de la température indique que les deux composts sont matures. D'où revêt, encore une fois, l'importance d'utiliser plus d'un test.

**Tableau 29 Test de maturité des composts à grande échelle au jour 107**

| Composts | $\Delta$ Temp. <sup>a</sup><br>(°C) | CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> <sup>b</sup><br>(%) | NH <sub>3</sub> <sup>c</sup><br>(ppm 4 h <sup>-1</sup> ) | Signification  |
|----------|-------------------------------------|---|--|--|
| T1       | 0-5                                 | 1.6   | 296  | Compost ayant passé la phase thermophile et prêt pour la phase de maturation |
| T2       | 0-5                                 | 0.71  | 282  | Compost mature avec quelques limitations d'usage                             |

**5.4.12. Mesures microbiologiques**

Les données relatives au dénombrement des coliformes fécaux, des BHAA et des salmonelles dans les composts à grande échelle au jour 107 sont présentées au Tableau 30. Le compost T2 répond aux critères microbiologiques exigés pour le compost de catégorie AA. Par contre, le compost T1 dépasse largement le seuil en ce qui concerne les teneurs en coliformes fécaux. Ceci peut s'expliquer par le fait que le processus de décomposition n'est pas encore terminé.

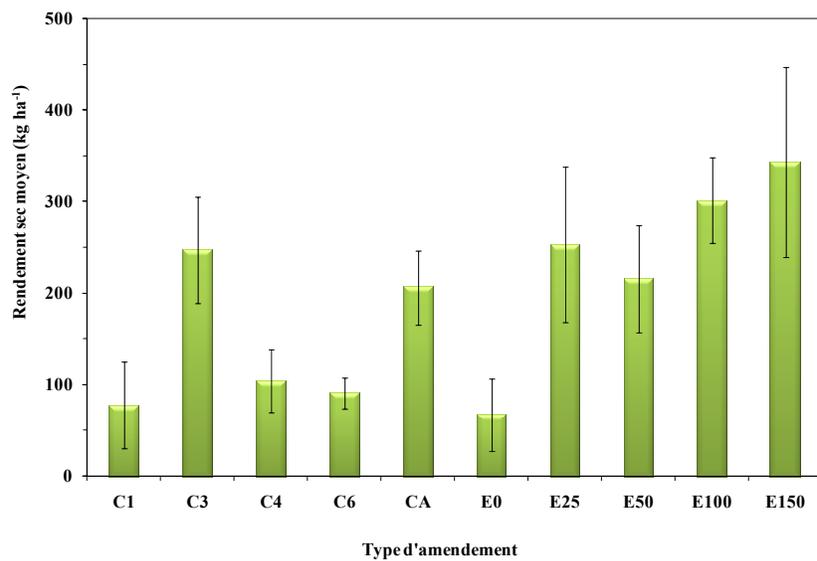
**Tableau 30 Dénombrement des coliformes fécaux, des BHAA et des salmonelles dans les composts à grande échelle au jour 107**

| Composts                   | Coliformes fécaux<br>NPP gps <sup>-1</sup> | Salmonelles<br>(10 g humide <sup>-1</sup> ) | BHAA<br>(UFC g <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------|--|---|--------------------------------|
| T1                         | 44 000                                     | absence                                     | 9.9 x 10 <sup>7</sup>          |
| T2                         | 160  | absence                                     | 5 x 10 <sup>7</sup>            |
| <i>Normes (compost AA)</i> | <i>&lt; 1000</i>                           | <i>&lt; 3 NPP 4 gps<sup>-1</sup></i>        | -                              |

## 5.5. ESSAIS AGRONOMIQUES

### 5.5.1. Essais agronomiques avec l'orge

Les rendements secs obtenus pour l'orge avec les divers types d'amendement sont présentés à la Figure 35. Il est à noter que la 4<sup>ème</sup> répétition des parcelles d'orge a été utilisée seulement pour les parcelles C1 et C4 qui nécessitaient un échantillonnage supplémentaire. Il existe une corrélation 80.1% ( $R^2$ ) entre la concentration en engrais minéral et les rendements obtenus.



**Figure 35 Rendements moyens sur une base sèche de l'orge selon le type d'amendement utilisé**

L'analyse de variance à un facteur montre qu'il y a un effet très significatif de l'amendement utilisé sur le rendement ( $F_{(9,31)} = 9.76$ ;  $p < 0.0001$ ). Selon le test de comparaisons multiples de moyennes *LSD* ( $p < 0.05$ ) (Figure 36):

- Les parcelles enrichies avec le compost C3 ont eu d'aussi bons rendements que les parcelles enrichies avec le compost acheté, ce qui est équivalent à ajouter un engrais minéral répondant de 25 à 100% aux besoins en azote de l'orge;
- Les parcelles enrichies avec les composts C1, C4 et C6 ont eu des rendements équivalents à ceux n'ayant eu aucun ajout d'amendement.

| Type d'amendement                          | E0    | C1 | C6 | C4  | CA    | E50 | C3    | E25 | E100 | E150 |
|--|-------|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|------|------|
| Rendement sec moyen (kg ha <sup>-1</sup> ) | 67    | 78 | 91 | 104 | 206   | 215 | 247   | 253 | 301  | 343  |
|  | _____ |    |    |     | _____ |     |       |     |      |      |
|  | _____ |    |    |     |       |     | _____ |     |      |      |

**Figure 36** Représentation des résultats du test *LSD* effectué sur les rendements secs de l'orge

Les quantités de compost épandues sur les parcelles étaient basées sur des analyses considérant que les éléments contenus dans les composts étaient disponibles à 40% pour la période d'étude. À la fin des essais agronomiques, les écales de cacao, riches en azote, étaient encore très nombreuses au sol (annexe D). Comme leur décomposition n'était pas totalement complétée,

l'orge, exigeante en azote, n'a probablement pas pu profiter de cet élément comme nous l'aurions souhaité. Étonnamment, les parcelles enrichies du compost C3 ont eu d'excellents rendements malgré le fait que la quantité d'écaillés de cacao présente dans ce compost est similaire au compost C1.

Le Tableau 31 indique les quantités en azote, phosphore assimilable, potassium assimilable, calcium total, magnésium total et soufre total ajoutées aux parcelles selon le type d'amendement utilisé. Ce Tableau tient compte des différentes quantités de compost mises par parcelle et d'une disponibilité de 40% pour l'azote, 65% pour le phosphore et 80% pour le potassium. Ces deux dernières valeurs ( $P_2O_5$  et  $K_2O$ ) sont celles généralement observées pour des fumiers de bovins pailleux (CRAAQ, 2003). Il existe très peu de données sur ces coefficients d'efficacité dans la littérature pour des composts. Nous pouvons supposer que les composts C1, C3, C4 et C6 s'apparentent à celle d'un fumier de bovin pailleux en ce qui a trait à la disponibilité du phosphore et du potassium. Pour les autres éléments nutritifs (Ca, Mg et S), nous avons considéré qu'ils étaient disponibles à 100%. À noter que les valeurs de base en azote des divers composts de Biscuits Leclerc utilisés sont celles obtenues lors de la seconde caractérisation des composts après la période d'entreposage. Par ailleurs, après vérification des teneurs en azote, la quantité de compost acheté épandue sur les parcelles répond théoriquement à 155% des besoins en azote de l'orge plutôt qu'à 100%. Cette différence peut expliquer les meilleurs rendements obtenus avec ce compost qu'avec les composts de Biscuits Leclerc. Les teneurs en éléments nutritifs et en métaux du compost acheté sont présentées à l'annexe E.

**Tableau 31** Quantité d'azote potentiellement disponible, phosphore assimilable, potassium assimilable, calcium, magnésium et soufre total apportée par parcelle selon le type d'amendement utilisé pour l'orge

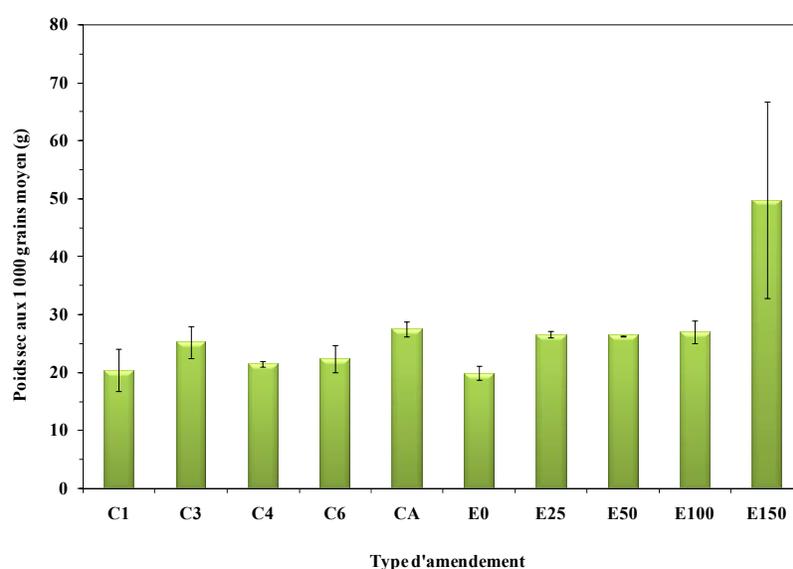
| Type d'amendement | Teneur (kg ha <sup>-1</sup> ) |                               |                  |     |    |    |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|-----|----|----|
|                   | N                             | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | Ca  | Mg | S  |
| C1                | 80                            | 30                            | 102              | 24  | 22 | 14 |
| C3                | 80                            | 25                            | 99               | 18  | 20 | 14 |
| C4                | 80                            | 37                            | 173              | 22  | 11 | 20 |
| C6                | 80                            | 29                            | 149              | 25  | 31 | 15 |
| CA                | 124                           | 179                           | 133              | 910 | 85 | 65 |
| E0                | 0                             | 40                            | 50               | x   | x  | x  |
| E25               | 20                            | 40                            | 50               | x   | x  | x  |
| E50               | 40                            | 40                            | 50               | x   | x  | x  |
| E100              | 80                            | 40                            | 50               | x   | x  | x  |
| E150              | 120                           | 40                            | 50               | x   | x  | x  |

$$P_2O_5 = P_{total} * 2.29, K_2O = K_{total} * 1.20$$

Une étude similaire à celle-ci a obtenu des rendements largement supérieurs (Côté, 1999). Les rendements de l'orge avec un compost constitué de fumier, de tourbe et de sciure dans des proportions 1:1:1 ont été de 1 545 à 2 040 kg ha<sup>-1</sup> ce qui est similaire aux rendements obtenus avec leur engrais minéral (1 700 kg ha<sup>-1</sup>). Dans la présente étude, compte-tenu de l'été pluvieux et des semis tardifs, la croissance des plants n'a pas été optimale ce qui peut expliquer cette grande différence de rendements. De plus, la variété utilisée est différente (Nadia). Les données météorologiques présentées en annexe F proviennent de la station de Trois-Rivières.

Le poids aux 1 000 grains de l'orge selon le type d'amendement utilisé est présenté à la Figure 37. Pour les parcelles C1, C4, CA, E25 et E150, quatre répétitions ont été utilisées et trois pour les autres parcelles. Une relation linéaire positive relativement forte ( $R^2 = 68.7\%$ ) lie le

poids aux 1 000 grains à la concentration de l'engrais minéral utilisée. Il est à noter que le grand écart type du poids aux 1 000 grains pour les parcelles enrichies à la plus forte dose de l'engrais minéral est dû à deux valeurs particulièrement élevées (58.6 et 60.4 g 1 000 grains<sup>-1</sup>). Les poids aux 1 000 grains de cette étude sont comparables à ceux de Côté (1999) qui sont de 29.9 g avec leur compost, de 30.9 g avec l'engrais minéral et de 28.4 g pour leur témoin.



**Figure 37 Poids secs aux 1 000 grains moyens de l'orge selon le type d'amendement utilisé**

Selon le test non-paramétrique de comparaisons de moyennes de Kruskal-Wallis, il y a un effet très significatif de l'amendement utilisé sur le poids aux 1 000 grains ( $p = 0.0010$ ). Le test de comparaisons multiples de moyennes de Dunn ( $p < 0.05$ ) permet de tirer les conclusions suivantes (Figure 38):

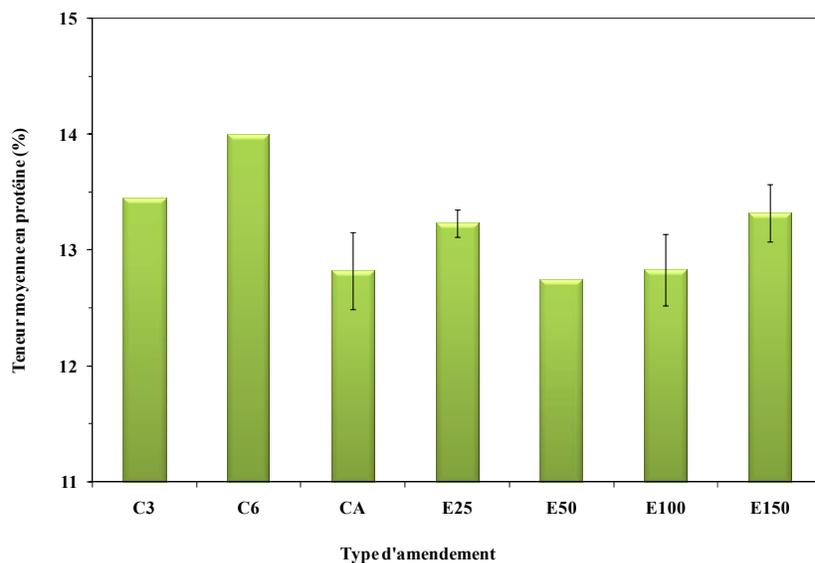
- L'ensemble des parcelles enrichies avec du compost a un poids aux 1 000 grains significativement semblable et équivalent aux parcelles ayant été enrichies avec un engrais minéral répondant jusqu'à 100% des besoins en azote;
- Les parcelles enrichies avec le compost C3 ont un poids moyen aux 1 000 grains équivalent à un enrichissement à l'engrais minéral répondant de 25 à 150% des besoins en azote pour l'orge.

| Type d'amendement                    | E0 | C1 | C4 | C6 | C3 | E50 | E25 | E100 | CA | E150 |
|--------------------------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|------|----|------|
| Poids sec aux 1 000 grains moyen (g) | 20 | 20 | 21 | 22 | 25 | 26  | 27  | 27   | 27 | 50   |

**Figure 38 Représentation des résultats du test de Dunn effectué sur le poids sec aux 1 000 grains de l'orge**

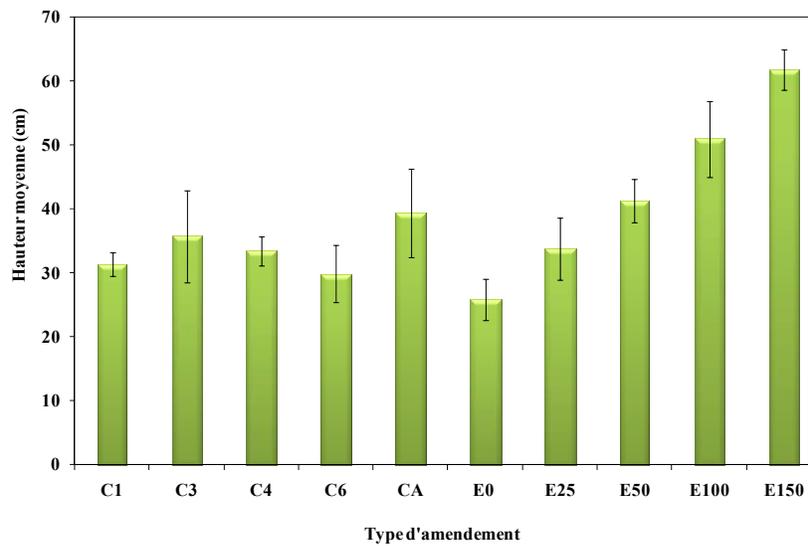
La Figure 39 présente la teneur en protéine des grains d'orge selon le type d'amendement utilisé. Les données pour C1, C4 et E0 n'ont pu être mesurées à cause de la trop faible abondance des grains dans l'ensemble des parcelles. Pour cette même raison, l'écart-type des amendements C3, C6 et E50 n'a pu être évalué. Le nombre de réplicas utilisé pour l'ensemble des types d'amendement varie donc de 0 à 4. La moyenne de la teneur en protéine est de  $13.2 \pm 0.4\%$  pour l'ensemble des types d'amendement ayant pu être mesurés. Comme l'écart type est faible, il peut

être supposé que les valeurs manquantes se rapprochent de cette moyenne. De plus, il peut être affirmé qu'il n'y a pas de forte corrélation entre la concentration en engrais minéral et la teneur en protéine ( $R^2= 3.36\%$ ). Ceci est probablement dû à la saison de croissance trop courte pour l'orge puisque la quantité de protéines est généralement corrélée avec la quantité d'azote appliquée au champ. Ainsi, nous aurions donc dû constater des différences entre E25 et E150, par exemple.



**Figure 39** Teneurs en protéine moyennes des grains d'orge selon le type d'amendement utilisé

Les hauteurs des plants d'orge selon le type d'amendement utilisé sont présentées à la Figure 40. Dans cette étude, la concentration en engrais minéral explique 99.4% ( $R^2$ ) des variations dans les hauteurs des plants d'orge.

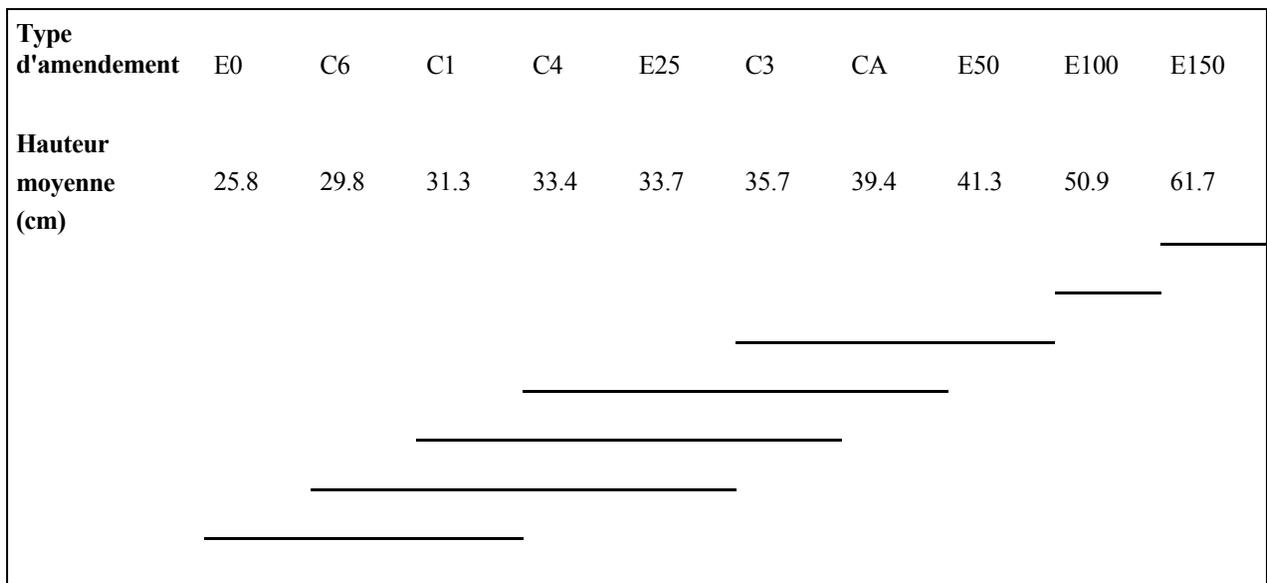


**Figure 40 Hauteurs moyennes de l'orge selon le type d'amendement utilisé**

Selon le test de Kruskal-Wallis, il y a un effet très significatif de l'amendement utilisé sur la hauteur de l'orge ( $p < 0.0001$ ). Le test de Dunn ( $p < 0.05$ ) permet de tirer ces conclusions (Figure 41):

- Les hauteurs de l'orge pour E100 et E150, indépendamment, sont significativement supérieures;
- Des parcelles enrichies avec les composts de Biscuits Leclerc, ce sont celles enrichies avec le C3 qui ont obtenues les plus grands plants qui sont eux-mêmes comparables aux hauteurs obtenues avec le compost acheté et l'engrais minéral répondant à 50% des besoins en azote de l'orge;

- Les hauteurs des plants enrichis avec le compost C4 sont comparables à celles obtenues sur les parcelles enrichies avec le compost acheté;
- Les parcelles enrichies avec les composts C1, C4 et C6 ont eu des plants d'hauteurs équivalentes à ceux des parcelles enrichies en engrais minéral répondant à 25% des besoins en azote de l'orge.

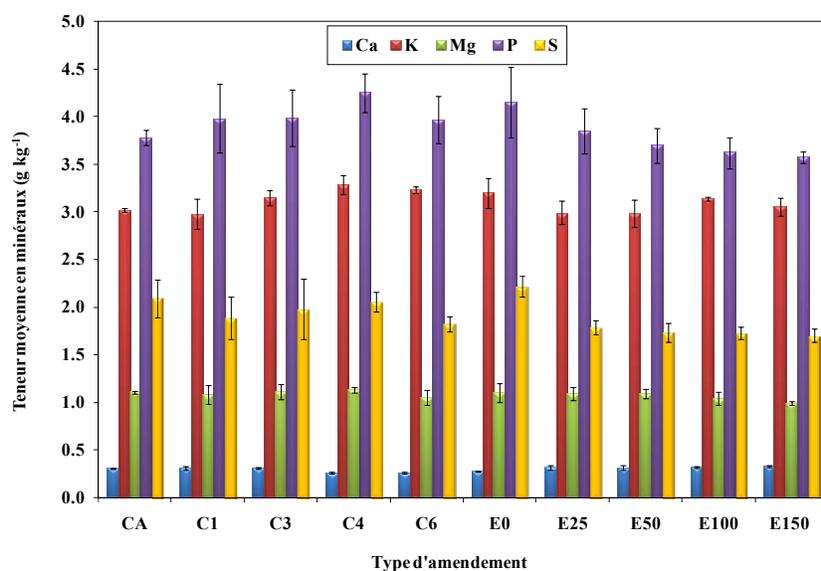


**Figure 41** Représentation des résultats du test de Dunn effectué sur les hauteurs de l'orge

Compte-tenu du fait que la teneur en azote des parcelles enrichies avec le compost acheté répond théoriquement à 155% des besoins en azote de l'orge plutôt qu'à 100% comme les autres composts, les hauteurs obtenues sur les parcelles enrichies des composts C3 et C4 sont appréciables.

Les hauteurs obtenues dans cette étude sont largement inférieures à celles de Côté (1999) de 107 cm avec leur compost, 106 cm pour l'engrais minéral et 97.3 cm pour le témoin. Comme pour les rendements, ces grandes différences sont probablement dues aux mauvaises conditions de croissance, aux semis tardifs et aux variétés différentes. Par ailleurs, il faut mentionner qu'il existe une forte corrélation entre la hauteur et le rendement de l'orge ( $R^2 = 72.7\%$ ).

La Figure 42 présente les teneurs en calcium, potassium, magnésium, phosphore et soufre des grains d'orge selon le type d'amendement utilisé.



**Figure 42** Teneur moyenne en minéraux des grains d'orge selon le type d'amendement utilisé

Pour la teneur en calcium, l'analyse de variance à un facteur montre qu'il y a un effet très significatif de l'amendement utilisé ( $F_{(9,29)} = 8.26$ ;  $p < 0.0001$ ). Selon le test de comparaisons

multiples de moyennes *LSD* ( $p < 0.05$ ), les grains d'orge ayant poussé sur les parcelles témoins et celles enrichies des composts C4 et C6 ont eu les mêmes teneurs en calcium qui sont elles-mêmes inférieures aux teneurs obtenues avec les autres amendements (Figure 43). Les teneurs en calcium mises sur les parcelles C4 et C6 sont équivalentes aux autres composts (Tableau 31). La forte proportion d'écailles de cacao de ces deux composts retient probablement le calcium. La composition des écailles de cacao se rapproche de celle du bois qui possède de moins bonnes capacités d'échange pour les cations divalents de calcium (DeGroot et Shafizadeh, 1984). De plus, ces deux composts ont apportés des quantités très élevées en potassium et même, largement supérieures aux besoins de la plante (Tableau 31). Nous savons qu'un excès de potassium dans le sol peut bloquer l'assimilation du calcium, du magnésium et du bore; ce phénomène se nomme antagonisme. Ainsi, il est fort probable que cet excès de potassium puisse, en partie, expliquer cette différence significative avec les autres composts. Aucune conclusion intéressante ne peut être tirée pour les parcelles sous engrais minéral puisque ces dernières n'ont pas eu d'apports supplémentaires de calcium autres que celui fournit par le sol.

| Type d'amendement  | C4   | C6   | E0   | CA   | C1   | E50  | C3   | E25  | E100 | E150 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Teneur moyenne en Ca <sup>++</sup> (g kg <sup>-1</sup> ) | 0.26 | 0.26 | 0.28 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.33 |

**Figure 43** Représentation des résultats du test *LSD* effectué sur les teneurs moyennes en calcium des grains d'orge

Pour le potassium, l'analyse de variance à un facteur montre qu'il y a un effet significatif de l'amendement utilisé ( $F_{(9,29)} = 3.38$ ;  $p = 0.0111$ ). Selon le test de comparaisons multiples de moyennes *LSD* ( $p < 0.05$ ) les résultats indiquent que l'orge ayant été enrichie avec les composts C4 et C6 a eu les plus fortes teneurs en potassium dans ses grains (Figure 44). Les parcelles enrichies avec ces composts sont largement plus riches en cet élément que les autres (Tableau 31). Les valeurs obtenues par Côté (1999) sont légèrement supérieures soit de  $4.4 \text{ g kg}^{-1}$  pour les parcelles avec compost et sans différence significative entre les engrais minéraux et le compost.

| Type d'amendement                                     | C1   | E50  | E25  | CA   | E150 | E100 | C3   | E0   | C6   | C4   |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Teneur moyenne en $\text{K}^+$ ( $\text{g kg}^{-1}$ ) | 2.98 | 2.98 | 2.99 | 3.02 | 3.05 | 3.14 | 3.15 | 3.20 | 3.23 | 3.29 |
|   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

**Figure 44** Représentation des résultats du test *LSD* effectué sur les teneurs moyennes en potassium des grains d'orge

Pour le magnésium, l'analyse de variance à un facteur montre qu'il y a un effet significatif de l'amendement utilisé ( $F_{(9,29)} = 1.02$ ;  $p = 0.4591$ ). En fait, selon le test de comparaisons multiples de moyennes *LSD* ( $p < 0.05$ ), il n'y a que les grains de l'orge ayant été enrichis avec le compost C4 qui ont eu des teneurs significativement différentes de celles de l'orge ayant reçu l'engrais

minéral à la plus forte dose (Figure 45). Ceci est difficilement explicable puisque, *primo*, c'est le compost C4 qui a fournit la plus petite quantité de magnésium à l'hectare pour la culture (Tableau 31) et *secundo*, la parcelle E150 n'a pas reçu d'apport magnésien, tout comme les autres parcelles sous engrais minéral. La seule conclusion à tirer de ces tests statistiques est qu'il n'y a aucune différence significative de teneur en magnésium des grains d'orge entre les divers composts analysés et ceci n'est pas surprenant puisque les apports se ressemblent beaucoup d'un compost à l'autre (Tableau 31).

|  |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>Type d'amendement</b>                                     | E150  | E100 | C6   | C1   | E25  | E50  | E0   | CA   | C3   | C4   |
| <b>Teneur moyenne en Mg<sup>++</sup> (g kg<sup>-1</sup>)</b> | 992.0 | 1040 | 1050 | 1080 | 1088 | 1089 | 1100 | 1106 | 1107 | 1130 |

**Figure 45** Représentation des résultats du test *LSD* effectué sur les teneurs moyennes en magnésium des grains d'orge

Pour le phosphore, l'analyse de variance à un facteur montre qu'il y a un effet significatif de l'amendement utilisé ( $F_{(9,29)} = 2.60$ ;  $p = 0.0358$ ). En fait, selon le test de comparaisons multiples de moyennes *LSD* ( $p < 0.05$ ), les grains de l'orge ayant poussé sur les parcelles enrichies avec les composts de Biscuits Leclerc ont eu une teneur en phosphore plus élevée équivalente à celle du compost acheté et aux parcelles témoins (Figure 46). Il est possible que le coefficient d'efficacité du phosphore soit plus élevé que ce que nous avons prévu au départ. En effet, avec un

coefficient de 65%, les divers composts appliqués au champ ont apportés des quantités soit équivalentes et même inférieures à ce qui a été appliqué sur les parcelles sous engrais minéraux (Tableau 31). Puisque le phosphore d'origine minérale (engrais minéraux) est disponible à 100% pour la plante, nous pouvons alors nous questionner sur ce coefficient d'efficacité de seulement 65%. Les valeurs obtenues par Côté (1999) sont légèrement supérieures: 4.95 g kg<sup>-1</sup> pour le compost, 4.46 g kg<sup>-1</sup> pour l'engrais et 5.01 g kg<sup>-1</sup> pour le témoin. Il est à noter que lors de cette étude, l'ensemble des besoins en phosphore était comblé et qu'il n'y avait pas de différences significatives selon le type d'amendement utilisé.

| Type d'amendement                         | E150 | E100 | E50  | CA   | E25  | C6   | C1   | C3   | E0   | C4   |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Teneur moyenne en P (g kg <sup>-1</sup> ) | 3.57 | 3.62 | 3.70 | 3.78 | 3.85 | 3.97 | 3.98 | 3.99 | 4.15 | 4.25 |

**Figure 46** Représentation des résultats du test *LSD* effectué sur les teneurs moyennes en phosphore des grains d'orge

Le test de Kruskal-Wallis montre un effet significatif de l'amendement utilisé sur la teneur en soufre ( $p = 0.0485$ ). Par contre, le test de comparaisons multiples de moyennes de Dunn ( $p < 0.05$ ) ne permet pas de déterminer quelles sont les différences. Les teneurs en soufre varient de 1.70 à 2.21 g kg<sup>-1</sup>. Les teneurs en carbone et en azote des grains d'orge ont également été

mesurées. Pour le carbone, le test de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre les types d'amendement utilisés ( $p = 0.2482$ ). Les teneurs en carbone se situent entre 371 et 442 g kg<sup>-1</sup>. Pour l'azote, l'analyse de variance à un facteur montre qu'il n'y a pas non plus de différences significatives dans les teneurs en azote entre les types d'amendement ( $p = 0.1036$ ). Les teneurs en azote se situent entre 18.0 et 28.0 g kg<sup>-1</sup>. Ceci est équivalent aux valeurs obtenues par Côté (1999) qui sont d'environ 21 g kg<sup>-1</sup>.

De manière générale, dans certaines études faites sur l'orge et divers légumes (Côté, 1999; Warman, 2001), il n'y a pas de différences significatives dans la teneur de divers éléments selon l'utilisation d'engrais minéral ou de compost. Dans d'autres études, selon l'élément et le légume, les teneurs les plus élevées favorisent tantôt l'engrais minéral, tantôt le compost (Warman et Havard, 1996, 1998). Les teneurs minimales et maximales d'autres éléments contenus dans les grains d'orge sont présentés au Tableau 32. Les teneurs en aluminium, sodium, fer, manganèse et zinc sont les plus fortes.

Globalement, pour l'orge, le compost C3 est le compost de Biscuits Leclerc qui a eu les meilleurs rendements secs et les plus grandes hauteurs donc, production potentielle de paille. Ses rendements ont été comparables à ceux obtenus avec la plus forte dose d'engrais minéral. Par contre, les hauteurs des plants enrichis chimiquement (E100 et E150) ont été plus hautes. Les composts C1, C4 et C6 n'ont pas permis d'obtenir des rendements intéressants comparativement à ce qui a été observé pour le compost acheté. Toutefois, la teneur en azote sur les parcelles enrichies du compost acheté répondait à 155% plutôt qu'à 100% des besoins en azote de l'orge ce qui peut expliquer les écarts obtenus. De plus, les hauteurs des plants d'orge enrichis des composts C1, C4 et C6 sont équivalentes à un très faible enrichissement minéral (E25). Ainsi, le

**Tableau 32 Teneurs minimales et maximales (mg kg<sup>-1</sup>) d'éléments contenus dans les grains d'orge pour l'ensemble des types d'amendements**

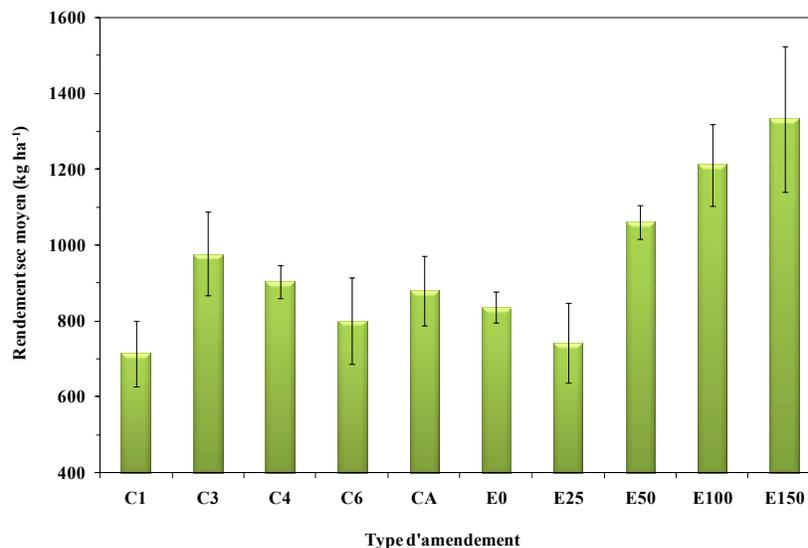
| Éléments | Minimum | Maximum |
|----------|---------|---------|
| Al       | 5.65    | 11.9    |
| As       | 0.12    | 0.48    |
| Cd       | 0.00    | 0.01    |
| Co       | 0.00    | 0.02    |
| Cr       | 0.39    | 0.58    |
| Cu       | 1.77    | 3.90    |
| Fe       | 27.3    | 39.7    |
| Mn       | 9.38    | 12.0    |
| Mo       | 0.73    | 1.57    |
| Na       | 19.6    | 29.0    |
| Ni       | 0.90    | 2.09    |
| Pb       | 0.04    | 0.30    |
| Se       | 0.52    | 0.89    |
| Zn       | 26.6    | 32.1    |

potentiel agronomique d'utilisation de ces composts comme fertilisant est plutôt limité, surtout pour des cultures de saison courte comme les céréales à paille. Un réajustement à la hausse des doses de compost de Biscuits Leclerc appliquées sur les parcelles pourrait permettre d'augmenter les rendements de l'orge, mais l'antagonisme avec le potassium et les risques d'enrichissement du sol à moyen terme avec cet élément nutritif ne sont pas à négliger. Il serait plutôt opportun de compléter la fertilisation azotée avec, par exemple, une source d'engrais minéral. Par ailleurs, l'orge ayant poussé sur les parcelles enrichies du compost C4 a eu la plus forte teneur en potassium, magnésium et phosphore, mais la plus faible teneur en calcium. Le compost C6 suit également cette tendance. À l'opposé, l'orge ayant poussé sur les parcelles enrichies avec les engrais minéraux à fortes doses possèdent les plus fortes teneurs en calcium et les plus faibles

teneurs en magnésium et phosphore. Il n'y a pas eu de différence significative dans les teneurs en azote et en carbone entre les types d'amendements utilisés

### 5.5.2. Essais agronomiques avec le lin

Pour l'ensemble des paramètres évalués sur le lin, seulement les réplicats 1, 2 et 3 ont été utilisés. Les rendements secs obtenus selon le type d'amendement sont présentés à la Figure 47. Il est à noter que les rendements réellement obtenus sont probablement plus grands. Étant donné la fragilité des plants, lors de la récolte, plusieurs graines sont tombées au sol. Cependant, ces pertes sont sensiblement les mêmes d'une parcelle à l'autre. Par ailleurs, il existe une forte corrélation ( $R^2 = 87.0\%$ ) entre la concentration en engrais minéral et les rendements.



**Figure 47 Rendements moyens sur une base sèche du lin selon le type d'amendement utilisé**

L'analyse de variance à un facteur sur le rendement montre qu'il y a un effet très significatif de l'amendement utilisé ( $F_{(9,29)} = 11.52$ ;  $p < 0.0001$ ). Selon le test de comparaisons multiples de moyennes *LSD* ( $p < 0.05$ ) (Figure 48):

- Des parcelles enrichies avec tous les composts, ce sont celles enrichies des composts C3 et C4 qui ont eu les meilleurs rendements qui sont équivalents à un enrichissement minéral répondant à 50% des besoins en azote du lin;
- Les parcelles enrichies en engrais minéral répondant à 100 et 150% des besoins minéraux ont eu les meilleurs rendements;
- Les parcelles enrichies des composts C1, C6 et du compost acheté ont eu des rendements similaires aux parcelles témoins et à celles enrichies d'un engrais minéral répondant à 25% des besoins en azote du lin.

Comme pour l'orge, après vérification des teneurs en azote, la quantité de compost acheté épandue sur les parcelles répond théoriquement à 155% des besoins en azote du lin plutôt qu'à 100%.

Les rendements obtenus sont similaires à ceux de Casa *et al.* (1999) qui varient entre 740 et 2 100 kg ha<sup>-1</sup> avec, pour amendement, un engrais minéral. Cependant, les résultats d'essais avec différents cultivars de lin réalisés au Québec entre 2003 et 2005 (Lavoie *et al.*, 2006) montrent des rendements variant de 1 569 à 1 796 kg ha<sup>-1</sup>, ce qui est nettement au-dessus de nos résultats. Ne perdons pas de vue que nous avons semé le lin avec un mois de retard, ce qui peut occasionner des pertes de rendements assez importantes.

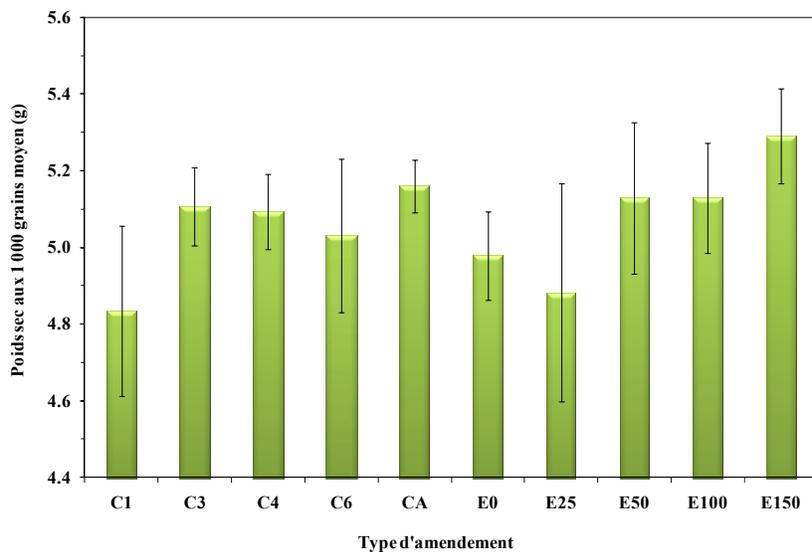
| Type d'amendement                          | C1  | E25 | C6  | E0  | CA  | C4  | C3  | E50  | E100 | E150 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Rendement sec moyen (kg ha <sup>-1</sup> ) | 714 | 743 | 801 | 837 | 880 | 903 | 978 | 1060 | 1210 | 1330 |

**Figure 48** Représentation des résultats du test *LSD* effectué sur les rendements du lin

Les poids aux 1 000 grains du lin selon le type d'amendement utilisé sont présentés à la Figure 49. Il est à noter que la concentration en engrais minéral explique 77.1% ( $R^2$ ) des variations des poids aux 1 000 grains.

L'analyse de variance à un facteur sur le poids aux 1 000 grains montre qu'il y a un effet significatif de l'amendement utilisé ( $F_{(9,29)} = 1.90$ ;  $p = 0.1112$ ). Selon le test de comparaisons multiples de moyennes *LSD* ( $p < 0.05$ ) (Figure 50), à l'exception du compost C1, tous les composts ont eu un poids aux 1 000 grains équivalent aux parcelles enrichies d'engrais minéral répondant de 50 à 150% des besoins en minéraux. Ces poids aux 1 000 grains sont inférieurs à ceux obtenus par Casa *et al.* (1999) avec un engrais minéral (6.5 à 8.7 g). Ces différences peuvent, entre autres, être expliquées par la variété différente (Mikael) et le lieu de l'étude (Italie). Par ailleurs, toujours selon les études réalisées au Québec (Lavoie *et al.*, 2006), les résultats démontrent des poids aux 1 000 grains variant de 5.2 à 6.3 g, dépendamment des cultivars utilisés. Pour Béthune, la variété que nous avons utilisée, le poids de 1 000 grains était

de 1 000 grains était de 5.4 g. Considérant la date de semis tardive de nos parcelles, nous considérons que la valeur obtenue pour E100 (5.13 g) est largement satisfaisante.



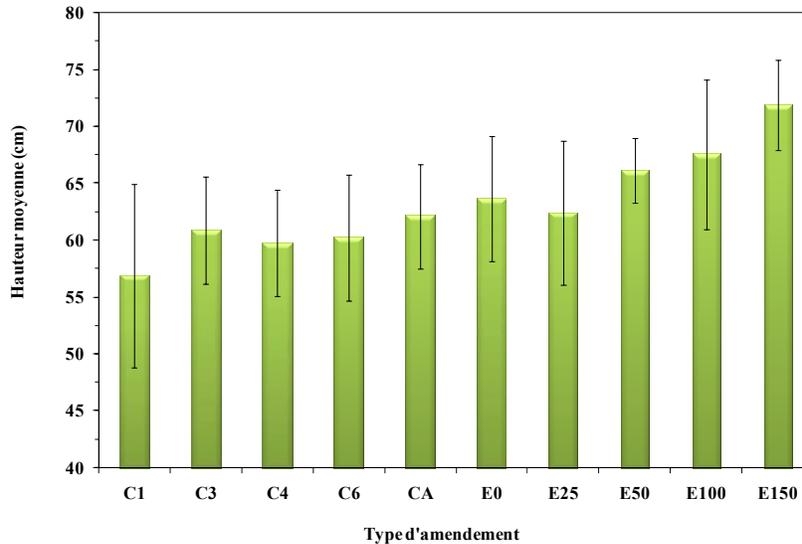
**Figure 49** Poids sec moyen aux 1 000 grains de lin selon le type d'amendement utilisé

| Type d'amendement                    | C1  | E25 | E0  | C6  | C4  | C3  | E50 | E100 | CA  | E150 |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| Poids sec aux 1 000 grains moyen (g) | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.0 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.1  | 5.2 | 5.3  |

Horizontal lines below the table indicate statistical groupings from the LSD test. The first line groups C1, E25, E0, C6, C4, C3, E50, E100, and CA. The second line groups E25, E0, C6, C4, C3, E50, E100, and CA. The third line groups C6, C4, C3, E50, E100, and CA.

**Figure 50** Représentation des résultats du test *LSD* effectué sur le poids aux 1 000 grains de lin

Les hauteurs des plants de lin selon le type d'amendement utilisé sont présentées à la Figure 51. Pour les parcelles enrichies à l'engrais minéral, la hauteur des plants est expliquée à 85.0% ( $R^2$ ) par la concentration de l'engrais.



**Figure 51** Hauteurs moyennes du lin selon le type d'amendement utilisé

L'analyse de variance à un facteur sur la hauteur montre qu'il y a un effet significatif de l'amendement utilisé ( $F_{(9,89)} = 5.51$ ;  $p < 0.0001$ ). Selon le test de comparaisons multiples de moyennes *LSD* ( $p < 0.05$ ) (Figure 52):

- Les plants situés sur les parcelles enrichies à 100 et 150% ont été significativement les plus grands;

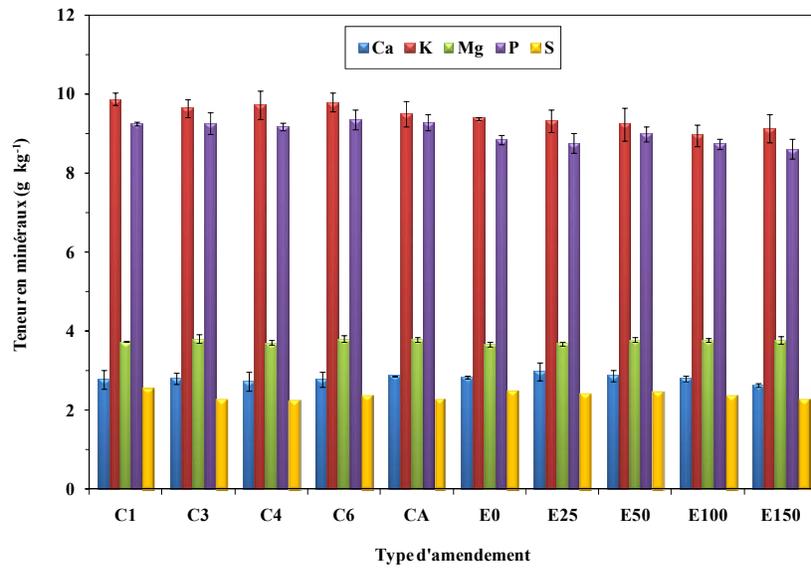
- À l'exception du compost C1, les hauteurs obtenues avec tous les composts étaient comparables à celles obtenues sur les parcelles témoins et enrichie de l'engrais minéral répondant à 25% des besoins en azote du lin.

| Type d'amendement    | C1   | C4   | C6   | C3   | CA   | E25  | E0   | E50  | E100 | E150 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Hauteur moyenne (cm) | 56.9 | 59.8 | 60.2 | 60.9 | 62.1 | 62.4 | 63.7 | 66.1 | 67.6 | 71.9 |

**Figure 52** Représentation des résultats du test *LSD* effectué sur les hauteurs du lin

Les hauteurs du lin sont comparables à celles obtenues par Casa *et al.* (1999) qui varient de 40 à 64 cm et largement supérieures aux résultats des essais de Lavoie *et al.* (2006) qui varient de 51 à 56 cm. Par ailleurs, comme pour l'orge, il existe une forte corrélation entre la hauteur et le rendement du lin pour l'ensemble des amendements testés ( $R^2 = 77.8\%$ ). La corrélation est d'autant plus forte lorsque les valeurs des engrais minéraux sont isolées ( $R^2 = 93.0\%$ ).

Les teneurs du calcium, potassium, magnésium, phosphore et soufre contenus dans les graines de lin selon le type d'amendement sont présentés à la Figure 53. Le Tableau 33 indique les teneurs disponibles de ces éléments et de l'azote selon le type d'amendement utilisé considérant les mêmes coefficients de disponibilité que ceux mentionnés dans la section sur l'orge.



**Figure 53** Teneur moyenne en minéraux des graines de lin selon le type d'amendement utilisé

**Tableau 33** Quantité d'azote potentiellement disponible, phosphore assimilable, potassium assimilable, calcium, magnésium et soufre total apportée par parcelle selon le type d'amendement utilisé pour le lin

| Type d'amendement | Teneur (kg ha <sup>-1</sup> ) |                               |                  |     |    |    |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|-----|----|----|
|                   | N                             | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | Ca  | Mg | S  |
| C1                | 50                            | 19                            | 63               | 15  | 14 | 8  |
| C3                | 50                            | 15                            | 61               | 11  | 12 | 8  |
| C4                | 50                            | 23                            | 106              | 13  | 20 | 12 |
| C6                | 50                            | 18                            | 93               | 16  | 19 | 9  |
| CA                | 77                            | 112                           | 83               | 568 | 53 | 41 |
| E0                | 0                             | 30                            | 20               | x   | x  | x  |
| E25               | 12                            | 30                            | 20               | x   | x  | x  |
| E50               | 25                            | 30                            | 20               | x   | x  | x  |
| E100              | 50                            | 30                            | 20               | x   | x  | x  |
| E150              | 75                            | 30                            | 20               | x   | x  | x  |

$$P_2O_5 = P_{total} * 2.29 \quad K_2O = K_{total} * 1.20$$

Selon le test de Kruskal-Wallis, il n'y a pas d'effet significatif de l'amendement utilisé sur la teneur en calcium dans les graines de lin ( $p = 0.5920$ ). Il n'y a pas non plus d'effet significatif de l'amendement utilisé sur le magnésium (analyse de variance à un facteur:  $F_{(9,29)}=1.86$ ,  $p = 0.1181$ ). Par contre, le test de Kruskal-Wallis montre un effet significatif de l'amendement sur la teneur en potassium des graines de lin ( $p = 0.0420$ ). Le test non-paramétrique de comparaisons multiples de moyennes de Dunn ( $p < 0.05$ ) permet d'affirmer que toutes les valeurs sont différentes entre elles ( $E100 < E150 < E50 < E25 < E0 < CA < C3 < C4 < C6 < C1$ ). Les parcelles enrichies des composts de Biscuits Leclerc ont reçues davantage de potassium que celles enrichies des engrais minéraux ce qui pourrait expliquer les teneurs plus élevées

retrouvées dans les graines de lin (Tableau 33). Pour le phosphore, l'analyse de variance à un facteur montre qu'il y a une différence significative selon le type d'amendement utilisé ( $F_{(9,29)} = 4.86$ ,  $p = 0.0016$ ). Selon le test de comparaisons multiples de moyenne *LSD* ( $p < 0.05$ ), le lin ayant été enrichi avec les composts possède des graines à teneur plus élevée en phosphore que les parcelles enrichies à l'engrais minéral (Figure 54). Encore une fois, ce résultat nous permet de douter du coefficient de disponibilité de 65% appliqué au phosphore provenant des divers composts. Il est fort probable qu'il soit plus élevé que cela. Selon le test de Kruskal-Wallis, il n'y a pas d'effet significatif de l'amendement sur la teneur en soufre ( $p = 0.1406$ ) et en azote ( $p = 0.0526$ ) des graines de lin. Celles-ci sont de 2.3 à 2.6 g kg<sup>-1</sup> pour le soufre et de 35.5 à 37.7 g kg<sup>-1</sup> pour l'azote. L'amendement a un effet sur la teneur en carbone des graines de lin (test de Kruskal-Wallis,  $p = 0.0344$ ), mais le test de Dunn n'est toutefois pas assez puissant pour déterminer les différences entre les types d'amendement. Les teneurs moyennes en carbone se situent entre 535 et 550 g kg<sup>-1</sup>.

| Type d'amendement                         | E150 | E100 | E25  | E0   | E50  | C4   | C1   | C3   | CA   | C6   |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Teneur moyenne en P (g kg <sup>-1</sup> ) | 8.61 | 8.74 | 8.75 | 8.84 | 8.99 | 9.18 | 9.24 | 9.25 | 9.28 | 9.35 |

**Figure 54** Représentation des résultats du test *LSD* effectué sur les teneurs moyenne en phosphore du lin

Les teneurs minimales et maximales d'autres éléments contenus dans les graines de lin sont présentées au Tableau 34. Les teneurs en cuivre, fer, manganèse, sodium et zinc sont les plus élevées.

**Tableau 34 Teneurs minimales et maximales (mg kg<sup>-1</sup>) d'éléments contenus dans les graines de lin pour l'ensemble des types d'amendements**

| Éléments | Minimum | Maximum |
|----------|---------|---------|
| Al       | 0.10    | 7.37    |
| As       | 0.08    | 0.38    |
| Cd       | 0.28    | 0.39    |
| Co       | 0.11    | 0.19    |
| Cr       | 0.27    | 0.44    |
| Cu       | 11.1    | 12.7    |
| Fe       | 40.4    | 53.3    |
| Mn       | 21.4    | 24.2    |
| Mo       | 0.65    | 0.80    |
| Na       | 71.5    | 187     |
| Ni       | 0.43    | 0.51    |
| Pb       | 0       | 1.13    |
| Se       | 0.56    | 1.00    |
| Zn       | 67.7    | 72.9    |

Globalement, les parcelles enrichies des composts C3 et C4 sont les composts de Biscuits Leclerc ayant eu les meilleurs rendements soit équivalent à un enrichissement minéral répondant à 50% des besoins en azote du lin. Cependant, d'un point de vue agronomique, ceci n'est pas suffisant pour obtenir des rendements optimaux. La fertilisation azotée pourrait être complétée par un apport supplémentaire sous forme d'engrais minéral, par exemple. Les composts C1 et C6

ont eu des rendements similaires aux parcelles témoins, enrichies d'engrais minéral répondant à 25% des besoins en azote du lin et de compost acheté. Même si les hauteurs et le poids aux 1 000 grains sont comparables pour l'ensemble des parcelles enrichies du compost de Biscuits Leclerc, les valeurs obtenues par C1 sont légèrement inférieures. De plus, peu importe le type d'amendement utilisé, il n'y a pas eu de différence significative dans les teneurs en calcium, magnésium, soufre et azote des graines de lin. Par contre, il y a eu plus de potassium et de phosphore dans les graines du lin qui ont été enrichies par les composts de Biscuits Leclerc. Enfin, il n'est pas surprenant de ne pas retrouver de différences très significatives entre les différents traitements puisque le lin n'est pas une culture très exigeante en éléments fertilisants et donc, possiblement peu influencée par les différences agronomiques caractérisant les composts testés.

### **5.5.3. Rendements pour l'ensemble des essais agronomiques**

Globalement, pour l'ensemble des essais agronomiques, le compost C3 de Biscuits Leclerc semble être le meilleur. Pour l'orge, il a eu les meilleurs rendements, soit des rendements similaires à ceux obtenus avec la plus forte dose d'engrais minéral (E150). Pour ce qui est du lin, les composts C3 et C4 ont eu les meilleurs rendements. Contrairement à l'orge, leurs rendements sont équivalents à un enrichissement minéral répondant à 50% des besoins en azote du lin.

Pour l'orge, les composts C1, C4 et C6 ont permis d'obtenir des rendements équivalents à ceux des parcelles témoins. Pour le lin, l'enrichissement avec les composts C1 et C6 a permis d'obtenir des rendements équivalents au compost acheté et à un enrichissement minéral répondant à 25% des besoins en azote du lin. Étant donné ces faibles rendements, il serait

souhaitable d'ajuster la fertilisation azotée avec une source d'engrais minéral. Il serait aussi possible d'ajuster à la hausse la quantité de compost à épandre pour mieux répondre aux besoins des plants. Cependant, les risques d'enrichissement en potassium des sols et les risques d'antagonisme entre éléments nutritifs sont des facteurs à ne pas négliger.

#### **5.5.4. Efficacité fertilisante des composts**

Le coefficient d'efficacité (CE) constitue une mesure d'efficacité fertilisante d'un produit.

La mesure de ce coefficient repose sur la comparaison de la courbe de rendements d'un engrais minéral à celui d'un produit testé pour une dose donnée. Ainsi, on cherche à comparer la quantité d'azote fournie par l'engrais minéral à celle de la fumure organique (les composts) pour obtenir un même accroissement de rendement.

Pour calculer les coefficients d'efficacité fertilisante des divers composts testés, il suffit de tracer les courbes de rendement pour l'engrais minéral et pour chacun des composts testés en fonction des quantités d'azote total apporté par chacun des traitements. Les équations de régression obtenues permettront, par le rapport des estimateurs de pente, à calculer les coefficients.

Le Tableau 35 illustre les résultats obtenus et les graphiques sont présentés aux Figures 55 et 56.

**Tableau 35 Coefficient d'efficacité fertilisante des divers composts pour la culture de l'orge et du lin**

| Culture | Coefficient d'efficacité des divers composts testés |     |    |    |     |
|---------|---|-----|----|----|-----|
|         | C1  | C3  | C4 | C6 | CA  |
| Orge    | 2%  | 31% | 6% | 4% | 24% |
| Lin     | nd  | 15% | 7% | nd | 5%  |

nd: Le rendements du lin à 50 kg ha<sup>-1</sup> d'azote potentiellement disponible est inférieur à celui de E0. Par conséquent, le coefficient est inexistant (la courbe de régression est négative).

Ce tableau nous permet d'apprécier rapidement l'efficacité des divers composts testés au champ selon les conditions agronomiques et climatiques présentes lors des essais de l'été 2008. Nous pouvons remarquer que le compost C3 se démarque dans la culture de l'orge avec un coefficient d'efficacité de 31%. Par la suite, le compost acheté a donné un coefficient d'efficacité de 24%. Les résultats obtenus pour les composts Biscuit Leclerc sont plutôt bas pour des composts ayant un rapport C/N en-dessous de 10% (minéralisation supposément rapide des produits). En effet, nous avons préalablement fixé ce coefficient à 40% pour les essais de fertilisation. Cependant, comme il a été mentionné auparavant, les écailles de cacao, riches en azote, ne se sont pas décomposées ou très peu décomposées, ce qui peut expliquer en partie ces résultats pour la culture de l'orge, relativement exigeante en cet élément. De plus, comme les semis se sont effectués tard en saison et que l'orge est une culture à saison courte, l'apport d'azote fourni par les composts est possiblement arrivé à un moment où l'orge n'en avait pas nécessairement besoin. Ce phénomène (minéralisation tardive) est fréquemment observé lorsque l'orge est fertilisée avec des fumiers pailleux, par exemple. De plus, la saison très pluvieuse n'a pas été optimale pour cette culture et ce, dans la plupart des champs de la région.

Pour la culture du lin, les résultats présentés précédemment portent à croire que la culture a très peu réagit aux différents fertilisants appliqués. Ceci est confirmé avec les très bas coefficients d'efficacité fertilisante obtenus. Une fois de plus, le compost C3 se démarque largement des autres composts testés même si le coefficient n'est que de 15%.

Globalement, le compost C1 et C6 ont donné les pires résultats d'un point de vue agronomique, alors que le compost C3 a donné les résultats les plus intéressants.

La fertilisation à base de ces composts, pour des cultures à saison courte comme les céréales (orge) pourrait être possible mais un apport d'engrais d'origine minérale pourrait être appliqué au sol pour combler quelque peu le manque d'azote fourni par la fumure organique. De plus, une attention particulière devra être portée afin de ne pas enrichir en potassium les sols recevant, année après année, de tel fertilisants puisqu'ils sont très riches en potassium, même pour le compost C3. Enfin, étant donné que les écailles de cacao ne se sont pas décomposées durant la saison de culture 2008, il est possible que les composts de Biscuits Leclerc aient un coefficient d'arrière-effet non négligeable. Cet aspect serait également à vérifier lors de la mise en place d'un programme de fertilisation optimal et adéquat.

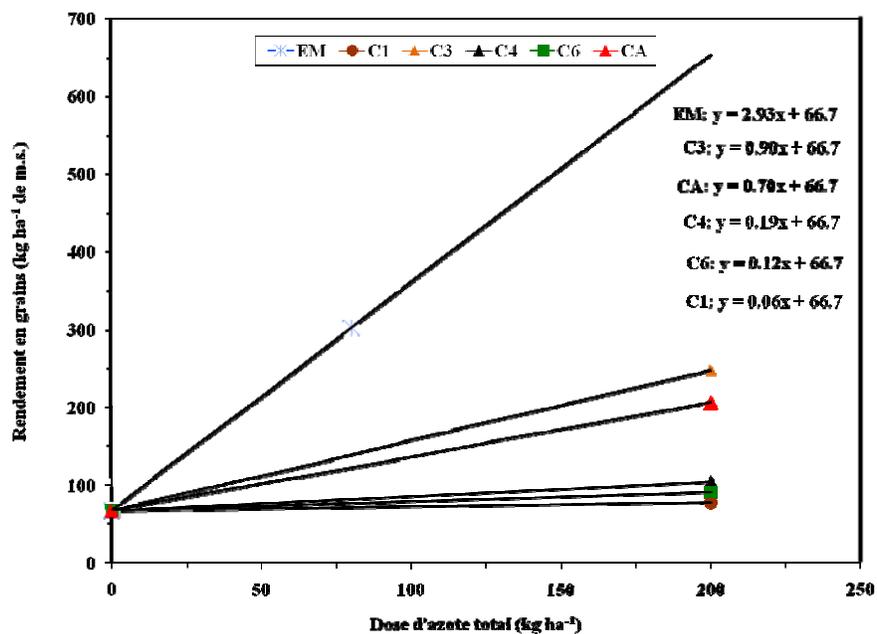


Figure 55 Rendement en grains de l'orge pour l'engrais minéral (EM) et les divers composts testés pour une plage de fertilisation de 0 à 80 kg ha<sup>-1</sup> d'azote disponible

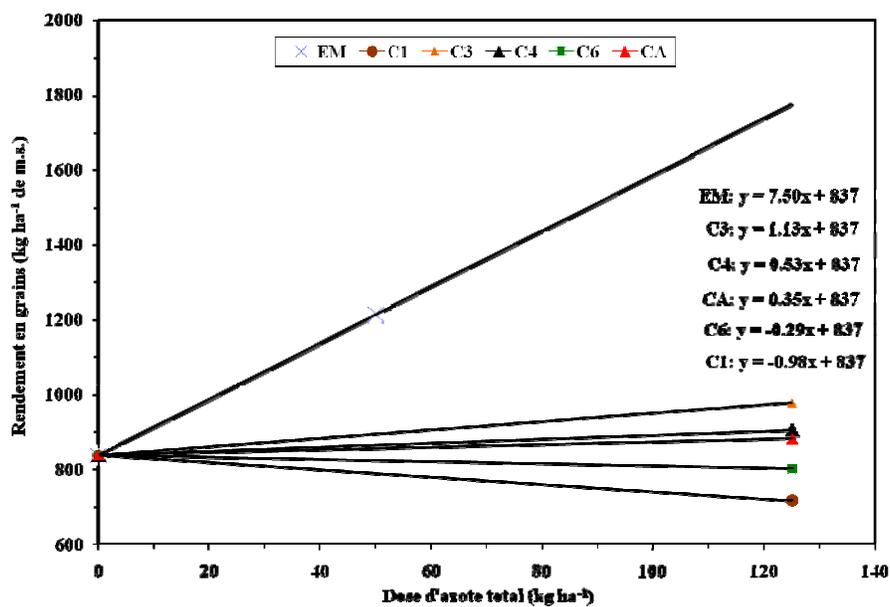


Figure 56 Rendement en grains du lin pour l'engrais minéral (EM) et les divers composts testés pour une plage de fertilisation de 0 à 80 kg ha<sup>-1</sup> d'azote disponible



## 6. CONCLUSION

Cette étude a permis, dans un premier temps, de réaliser un inventaire détaillé des coproduits organiques des trois usines de Biscuits Leclerc de la région de Québec. Ces usines produisent des biscuits, du chocolat, des céréales et des barres collations. L'inventaire et la caractérisation des coproduits a permis d'identifier des formulations adéquates de compostage des différentes familles d'intrants (coproduits). Ensuite, des essais de compostage à petite échelle, constitués de six piles d'environ 2 m<sup>3</sup> retournées manuellement, ont été réalisés dans des installations couvertes. L'aération et le taux d'humidité sont deux paramètres clés de l'opération des procédés de compostage. Ils ont donc été étudiés plus en détails lors de ces essais de compostage. Les piles ont été aérées naturellement et par retournements manuels deux fois par semaine ou une fois aux deux semaines selon les mélanges. Des composts d'excellente qualité, répondant aux exigences de qualité AA (normes du BNQ), ont été générés au terme d'une période de quatre mois de compostage. Ces essais ont ainsi permis de montrer que les écailles de cacao constituent un excellent agent de foisonnement et que les coproduits de ce type d'industrie alimentaire peuvent être aisément valorisés en produisant un compost ayant une excellente valeur commerciale.

Des essais agronomiques avec des cultures d'orge et de lin ont été effectués avec les composts issus des essais à petite échelle. Le but était de comparer, notamment, les rendements des plants enrichis avec les composts, un compost vendu sur le marché et différentes doses d'engrais minéraux. Le compost sans intrants de la famille Biscuits est le compost de Biscuits Leclerc qui a eu les meilleurs rendements. Avec l'orge, ses rendements

ont été statistiquement similaires à ceux obtenus avec la plus forte dose d'engrais minéraux (E150). Son coefficient d'efficacité a aussi été supérieur à celui du compost acheté, c'est-à-dire de 31%. Ce résultat est appréciable, compte-tenu qu'après vérification, la teneur en azote épandue sur les parcelles enrichies du compost acheté répond théoriquement à 155% des besoins en azote de l'orge plutôt qu'à 100%. Par contre, probablement à cause d'une minéralisation tardive, les autres composts ont eu de très faibles efficacités fertilisantes avec des rendements statistiquement équivalents à ceux où l'on n'a ajouté aucun engrais minéral. Avec le lin, les composts C3 et C4 ont eu les meilleurs rendements (équivalents à un enrichissement minéral répondant à 50% des besoins en azote du lin), tandis que les composts C1 et C6 ont eu des rendements similaires aux parcelles témoins.

Afin de vérifier l'applicabilité du compostage à une échelle industrielle, des essais ont été ensuite menés sur des tas d'environ 8 et 14 tm. Ces piles ont été retournées avec une pelle mécanique et les essais ont été suivis sur une période de quatre mois. Les différents paramètres du suivi des composts ont été similaires à ceux des essais à petite échelle. Par contre, étant donné les brassages moins fréquents, un des deux mélanges n'était pas encore totalement dégradé à la fin de la période d'étude. Par ailleurs, l'absence de structure bétonnée et d'un système permettant de recueillir le lixiviat ont eu pour conséquence de rendre plus difficile les brassages, ainsi que d'apporter des quantités non-négligeables de terre aux mélanges.

## 7. RECOMMANDATIONS

Cette étude a démontré que le compostage des résidus de Biscuits Leclerc permet d'obtenir un compost de haute qualité. Toutefois, compte tenu des résultats obtenus lors des essais agronomiques, il serait intéressant de:

- Tester le compostage d'un mélange similaire au C3, c'est-à-dire sans intrants des Biscuits, mais ayant une moins grande proportion d'écaillés de cacao. Ceci pourrait permettre d'éviter de trop enrichir le sol en potassium et de pouvoir utiliser plus fréquemment le compost obtenu;
- Effectuer des tests agronomiques sur l'orge plus tôt en saison, afin d'évaluer l'efficacité fertilisante dans de meilleures conditions;
- Effectuer des tests agronomiques avec une plus grande quantité de compost de Biscuits Leclerc par parcelle. Étant donné la plus faible disponibilité de l'azote que celle estimée pour les tests agronomiques, ceci pourrait permettre de vérifier des améliorations dans les rendements;
- Vérifier le temps de décomposition totale des écaillés de cacao après leur application en champs (temps avant qu'elles ne soient plus visibles). Ceci permettrait d'estimer la disponibilité de l'azote dans le temps.



## 8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdulla H.M. et S.A. El-Shatoury (2007) Actinomycetes in rice straw decomposition. *Waste Manag.* 27(6), 850-853.
- Abid N., M. Chamkha, J.J. Godon et S.Sayadi (2007) Involvement of microbial populations during the composting of olive mill wastewater sludge. *Environ. Technol.* 28(7), 751-760.
- Adani, F., C. Ubbiali, F. Tambone, B. Scaglia, M. Centemero et P. Genevini (2002) Static and dynamic respirometric indices—Italian research and studies. Dans: *The biological treatment of biodegradable waste – Technical aspects*. The Environment DG and the Joint Research Centre of the European Commission, Bruxelles, Belgique, 8-10 avril, pp. 8-10.
- Adani, F., P.L. Genevini, F. Gasperi et G. Zorzi (1997) Organic matter evolution index (OMEI) as a measure of composting efficiency. *Compost Sci. Util.* 5(2), 53-62.
- ADAS Consulting Ltd. (2003) Assessment of options and requirements for stability and maturity testing of compost, technical report. ADAS Consulting Ltd. Banbury, Oxon, Royaume-Uni, 80 p.
- Ahmad Y. et R. Bhargava (2005) Vermicomposting of filter mud from sugar industry mixed with food wastes. *J. Inst. Public Health Eng. India* 1, 34-37.
- APHA, AWWA et WPCF (1999) Standards methods for examination of water and wastewaters. 20<sup>ième</sup> éd. American Public Health Association, American Water Works Association et Water Pollution Control Federation, Washington, D.C.
- Archwood Greenhouses (2008) Hot box. Page Web: <http://www.archwoodgreenhouses.com/2/index.php?page=product&prodId=301>. Page consultée le 24 octobre 2008.
- Arnold P. (2008) Miller composting corporation. Page Web: [http://aics.acadiau.ca/\\_case\\_studies/millercomposting.html](http://aics.acadiau.ca/_case_studies/millercomposting.html). Page consultée le 17 septembre 2008.
- Arvanitoyannis I.S. et A. Kassaveti (2007) Current and potential uses of composted olive oil waste. *Int. J. Food Sci. Technol.* 42(3), 281-295.
- Bart-Plange A. et E.A. Baryeh (2003) The physical properties of category B cocoa beans. *J. Food Eng.* 60(3), 219-227.
- Benito M., A. Masaguer, A. Moliner et R. De Antonio (2006) Chemical and physical properties of pruning waste compost and their seasonal variability. *Biores. Technol.* 97, 2071–2076.
- Benito M., A. Masaguer, A. Moliner, N. Arrigo et R.M. Palma (2003) Chemical and microbiological parameters for the characterisation of the stability and maturity of pruning waste compost. *Biol. Fertil. Soils* 37(3), 184–189.
- Bernal M.P., C. Paredes, M.A. Sánchez-Monedero et J. Cegarra (1998) Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Biores. Technol.* 63(1), 91-99.
- Blanco M.J. et G. Almendros (1995) Evaluation of parameters related to chemical and agrobiological qualities of wheat-straw composts including different additives. *Biores. Technol.* 51, 125-134.
- BNQ (2005) Norme nationale du Canada CAN/BNQ 0413-200/2005. Amendements organiques – composts. Bureau de normalisation du Québec et Conseil canadien des normes, Sainte-Foy, QC, Canada, 27 p.
- Bouché M.B. (1994) Le lombricompostage industriel des déchets. *Agrosol* 7(1), 26-33.
- Burelle S., C. Fleury, M. Morency, G. Parent, P. Walsh et M. Hébert (2008) Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage. Direction des politiques en milieu terrestre, Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs, Gouvernement du Québec, Québec, QC, Canada, 47 p.
- Butlera T.A., L.J. Sikora, P.M. Steinhilberb et L.W. Douglassb (2001) Compost age and sample storage effects on maturity indicators of biosolids compost. *J. Environ. Qual.* 30, 2141-2148.

- Cabanas-Vargas D.D., M.A. Sanchez-Monedero, S.T. Urpilainen, A. Kamilaki, E.I. Stentiforg (2005) Assessing the stability and maturity of compost at large-scale plants. *Ingenieria* 9(2), 25–30.
- Cáceres R., X. Flotats et O. Marfà (2006) Changes in the chemical and physicochemical properties of the solid fraction of cattle slurry during composting using different aeration strategies. *Waste Manag.* 26(10), 1081-1091.
- Cantin S. (1998) Caractérisation de l'évolution de composts et de lixiviats: relations avec le processus de compostage et la qualité des eaux. Mémoire de maîtrise, INRS-Eau, Université du Québec, Sainte-Foy, QC, Canada, 184 p.
- Casa R., G. Russell, B. Lo Cascio et F. Rossini (1999). Environmental effects on linseed (*Linum usitatissimum* L.) yield and growth of flax at different stand densities. *Eur. J. Agron.* 11(3-4), 267-278.
- CCME (2005) Lignes directrices pour la qualité du compost. Conseil canadien des ministres de l'environnement, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Cegarra J., J.A. Alburquerque, J. Gonzalez, G. Tortosa et D. Chaw (2006) Effects of the forced ventilation on composting of a solid olive-mill by-product (alperujo) managed by mechanical turning. *Waste Manag.* 26(12), 1377-1383.
- Chang, J.I., J.J. Tsai et K.H. Wu (2005) Mathematical model for carbon dioxide evolution from the thermophilic composting of synthetic food wastes made of dog food. *Waste Manag.* 25(10), 1037-1045.
- Changa C.M., P. Wang, M.E. Watson, H.A.J. Hoitink et F.C. Michel Jour. (2003) Assessment of the reliability of a commercial maturity test kit for composted manures. *Compost Sci. Util.* 11(2), 125-143.
- Cooperbrand L.R., A.G. Stone, M.R. Fryda et J.L. Ravet (2003) Relating compost measures of stability and maturity to plant growth. *Compost Sci. Util.* 11(2), 113-124.
- CRAAQ (2003) Guide de référence en fertilisation, 1re Édition, CRAAQ, Québec, Canada, 294 p.
- Côté N. (1999) Impact agronomique de l'application de composts à base de résidus chitineux. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, 73 pages.
- Cronje A., C. Turner, A. Williams, A. Barker et S. Guy (2003) Composting under controlled conditions. *Environ. Technol.* 24(10), 1221-1234.
- De Groot W.F. et F. Shafizadeh (1984) The influence of exchangeable cations on the carbonization of biomass. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 6(3), 217-232.
- de Guardia A., C. Petiot et D. Rogeau (2008) Influence of aeration rate and biodegradability fractionation on composting kinetics. *Waste Manag.* 28(1), 73-84.
- Demirbas, A. (2009) Pyrolysis Mechanisms of Biomass Materials. *Energy Sources Part A-Recov. Util. and Environ. Effects.* 31 (13) 1186-1193.
- de Oliveira S.C., M.R. Provenzano, M.R.S. Silva et N. Senesi (2002) Maturity degree of composts from municipal solid wastes evaluated by differential scanning calorimetry. *Environ. Technol.* 23(7), 1099–1105.
- Diaz L.F., G.M. Savage, L.L. Eggerth et C.G. Golueke (1993) Composting and recycling municipal solid waste. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 296 p.
- Double T equipment (2008) Bunkers and tunnels. Page Web: <http://www.dte.ca/web/products-display.shtml?pfl=products-display.parameters&op2.rf1=48>. Page consultée le 24 octobre 2008.
- Douwes J., P. Thorne, N. Pearce et D. Heederik (2003) Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects. *Ann. Occup. Hyg.* 47(3), 187-200.
- Douwes J., I. Wouters, H. Dubbeld, L. van Zwieten, P. Steerenbert, G. Doekes et D. Heederik (2000) Upper airway inflammation assessed by nasal lavage in compost workers: a relation with bio-aerosol exposure. *Am. J. Ind. Med.* 37, 459–469.

- Eklind, Y., C. Sundberg, S. Smårs, K. Steger, I. Sundh, H. Kirchmann et H. Jönsson (2007) Carbon turnover and ammonia emissions during composting of biowaste at different temperatures. *J. Environ. Qual.* 36, 1512–1520.
- Elliott D.C., D. Beckman, A.V. Bridgwater, J.P. Diebold, S.B. Gevert et Y. Solantausta (1991) Developments in Direct Thermochemical Liquefaction of Biomass: 1983-1990. *Energy & Fuels.* 5, 399-410.
- Enviro Accès, Transfert Environnement et Centre de recherche industriel du Québec (2003) La production de compost au Québec en 2002, Résultats de l'enquête. Québec, QC, Canada, 21 p.
- Epstein, E., Servo, S., Ettlin, L., Cutler, A., et Sullivan, D. 2005. Composting of commercial food waste: pathogens and related environmental issues. *J. Residuals Sci. Technol.* 2(2), 79-89.
- Evans T. (2007) Food waste-global warming potentials of the options. 12th European Biosolids and Organic Resources Conference, Aqua Enviro, Manchester, Royaume-Uni.
- Faugeron C. (1992) Le compostage est-il encore une réponse au problème d'élimination des déchets organiques?. *Eau Industrie Nuisances* 153, 62-66.
- FCQAO (1994) Methods book for the analysis of compost-in addition with the results.
- Finstein M.S. et M.L. Morris (1975) Microbiology of municipal solid waste composting. *Adv. Appl. Microbiol.* 19, 113-151.
- Forcier F. et M. Laquerre (2004) Filière des matières résiduelles compostables, Plan stratégique préliminaire. Recyc-Québec, Québec, QC, Canada, 25 p.
- Garg, P., A. Gupta et S. Satya (2006) Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study. *Biores. Technol.* 97(3), 391-395.
- Garland G.A., T.A. Grist et R.E. Green (1995) The compost story: from soil enrichment to pollution remediation. *Biocycle* 36(10), 53-56.
- Gea T., R. Barrena, A. Artola et A. Sanchez (2004) Monitoring the biological activity of the composting process: oxygen uptake rate (OUR), respirometric index (RI), and respiratory quotient (RQ). *Biotechnol. Bioeng.* 88(4), 520–527.
- Gélinas, C., M. Héroux, T. Pagé et O. Gayet (2004) Projet de recherche et de démonstration sur la mesure, la prévention et le contrôle, la prévision, la surveillance et la détection des odeurs liées aux opérations de compostage. Rapport final, Montréal, QC, Canada, 95 p.
- Global Earth Products (2008) Marvel. Page Web: [http://www.globalearthproducts.com/marvel\\_composter.htm](http://www.globalearthproducts.com/marvel_composter.htm). Page consultée le 24 octobre 2008.
- Golueke C.G. (1991a). Operational, nutritional and environmental factors. Dans: *The biocycle guide to the art & science of composting.* J. Goldstein, P. Emmaus et J. Goldstein (Éditeurs), The J. G. Press, Inc. Emmaus, PA, pp. 28-30.
- Golueke C.G. (1991b). Understanding the process. Dans: *The biocycle guide to the art & science of composting.* J. Goldstein, P. Emmaus et J. Goldstein (Éditeurs), The J. G. Press, Inc. Emmaus, PA, pp. 14-27.
- Golueke C.G. et L.F. Diaz (1996) Historical review of composting and its role in municipal waste management. Dans: *The sciences of composting.* P. De Bertoldi, B. Lemmes, T. Papi (Éditeurs), Blackie Academic and Professional, Glasgow, Royaume-Uni, pp. 3-14.
- Gomez R.B., F.V. Lima et A.S. Ferrer (2006) The use of respiration indices in the composting process: a review. *Waste Manag. Res.* 24(1), 37-47.
- Green Mountain Technologies (2008) The earth tub. Page Web: <http://www.gmt-organic.com/EarthTub/et-info.php>. Page consultée le 24 octobre 2008.
- Green Mountain Technologies (2008) The CSS: Containerized Composting System™. Page web: <http://www.compostingtechnology.com/CCS/comptainer.php>. Page consultée le 24 octobre 2008.

- Hamelers H.V.M. (1993) A theoretical model of composting kinetics. H.A.J. Hoitink et H.M. Keener (Éditeurs), Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects, Renaissance Publications, Worthington, Royaume-Uni, pp. 36–58.
- Harada Y. et A. Inoko (1980) Relationship between cation-exchange capacity and degree of maturity of city refuse composts. *Soil Sci. Plant Nutr.* 26, 353-362.
- Hardy G.E.S.J. et K. Sivasithamparam (1991) Suppression of *Phytophthora* root rot by a composted *Eucalyptus* bark mix. *Aust. J. Botan.* 39(2), 153-159.
- Hassen A., K. Belguith, N. Jedidi, A. Cherif, M. Cherif et A. Boudabous (2001) Microbial characterization during composting of municipal solid waste. *Biores. Technol.* 80(3), 217-225.
- He X.T., T.J. Logan et S.J. Traina (1995) Physical and chemical characteristics of selected U.S. municipal solid waste composts. *J. Environ. Qual.* 24, 543-552.
- He X.T., S.J. Traina et T.J. Logan (1992) Chemical-properties of municipal solid-waste composts. *J. Environ. Qual.* 21(3), 318-329.
- Hoitink H.A.J., Y. Inbar et M.J. Boehm (1991) Status of compost-amended potting mixes naturally suppressive to soilborne diseases of floricultural crops. *Plant Dis.* 75(9), 869-873.
- Hoog D. (2004) Costs and benefits of bioprocesses in waste management. Dans: Resource recovery and reuse in organic solid waste management. P. Lens, B. Hamelers, H. Hootink et W. Bidlingmaier (Éditeurs), IWA Publishers, Londres, Royaume-Uni, pp. 95-121.
- Hue, N. V. et J. Liu (1995). Predicting compost stability. *Compost Sci. Utilization.* 3, 8-15.
- Iannotti D.A., M.E. Grebus, B.L. Toth, L.V. Madden et H.A.J. Hoitink (1994) Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste. *J. Environ. Qual.* 23, 1177-1183.
- Komilis, D. P. (2006). A kinetic analysis of solid waste composting at optimal conditions. *Waste Manag.* 26(1), 82-91.
- Körner, I., J. Braukmeier, J. Herrenklage, K. Leikam, M. Ritzkowski, M. Schlegelmilch et R. Stegmann (2003) Investigation and optimization of composting processes-test systems and practical examples. *Waste Manag.* 23(1), 17-26.
- Kulcu R. et O. Yaldiz (2004) Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. *Biores. Technol.* 93(1), 49-57.
- Kwon S.H. et D.H. Lee (2004) Evaluation of Korean food waste composting with fed-batch operations II: using properties of exhaust gas condensate. *Proc. Biochem.* 39(9), 1047-1055.
- Lacey J. et B. Crook (1988) Fungal and actinomycete spores as pollutants of the workplace and occupational allergens. *Ann. Occup. Hyg.* 32(4), 515-533.
- Laos F., M.J. Mazzarino, I. Walter et L. Roselli (1998) Composting of fish waste with wood by-products and testing compost quality as a soil amendment: experiences in the Patagonia region of Argentina. *Compost Sci. Util.* 6(1), 59-67.
- Lasaridi K.E. et E.I. Stentiford (1998) A simple respirometric technique for assessing compost stability. *Water Res.* 32(12), 3717-3723.
- Lavoie G., L. Robert et P. Turcotte (2006) Le lin oléagineux, Feuillet technique, CRAAQ, Québec, Canada, 12 p.
- Lee J.J., R.D. Park, Y.W. Kim, J.H. Shim, D.H. Chae, Y.S. Rim, B.K. Sohn, T.M.H. Kim et K.Y. Kim (2004) Effect of food waste compost on microbial population, soil enzyme activity and lettuce growth. *Biores. Technol.* 93(93), 21-28.
- Lu L.A., M. Kumar, J.C. Tsai et J.G. Lin (2008) High-rate composting of barley dregs with sewage sludge in a pilot scale bioreactor. *Biores. Technol.* 99, 2210-2217.

- Lyon P.F., T. Beffa, M. Blanc, G. Auling et M. Aragno (2000) Isolation and characterization of highly thermophilic xylanolytic *Thermus thermophilus* strains from hot composts. *Can. J. Microbiol.* 46(11), 1029-1035.
- Maduako J.N. et M.O. Faborode (1994) Characterization of the breaking behaviour of whole cocoa pods. *J. Agr. Eng. Res.* 59(2), 89-96.
- Maheshwari R., G. Bharadwaj et K.M. Bhat (2000) Thermophilic fungi: their physiology and enzymes. *Microbiol. Mol. Biol. Res.* 64(3), 461-488.
- Marshall M.N., A.P. Reddy et J.S. VanderGheynst (2004) Microbial ecology of compost. Dans: Resource recovery and reuse in organic solid waste management. P. Lens, B. Hamelers, H. Hoitink et W. Bidlingmaier (Éditeurs), IWA Publishers, Londres, Royaume-Uni, pp. 193-224.
- Mason I.G. et M.W. Milke (2005) Physical modelling of the composting environment: A review. Part 1. Reactor systems. *Waste Manag.* 25, 481-500.
- Matteson T.L. et D.M. Sullivan (2006) Stability evaluation of mixed food waste composts. *Compost Sci. Util.* 14(3), 170-177.
- MDDEP (2008) Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage. Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction des politiques en milieu terrestre, Service des matières résiduelles, Gouvernement du Québec, Québec, QC, 47 pages.
- MDDEP (1999) Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008. *Gazette Officielle du Québec* 132, 968-974.
- Moll C.H. (2004) Material metabolism through society and environment: a new view on waste management. Dans: Resource recovery and reuse in organic solid waste management. P. Lens, B. Hamelers, H. Hoitink et W. Bidlingmaier (Éditeurs), IWA Publishers, Londres, Royaume-Uni, pp. 3-22.
- Mulligan C.N. (2002) Environmental biotreatment: technologies for air, water, soil, and waste. Government Institutes, Rockville, MD, 395 p.
- Mustin M. (1987) Le compost: gestion de la matière organique. Editions Francois Dubusc, Paris, France, 954 p.
- Nakasaki K., N. Aoki et H. Kubota (1994) Accelerated composting of grass clippings by controlling moisture level. *Waste Manag. Res.* 12(1), 13-20.
- Nakasaki K., H. Yaguchi, Y. Sasaki et H. Kubota (1993) Effects of pH control on composting of garbage. *Waste Manag. Res.* 11(2), 117-125.
- Nakasaki K., K. Nag et S. Karita (2005) Microbial succession associated with organic matter decomposition during thermophilic composting of organic waste. *Waste Manag & Res.* 23(1), 48-56.
- Noble R., P.J. Hobbs, A. Mead et A. Dobrovin-Pennington (2002) Influence of straw types and nitrogen sources on mushroom composting emissions and compost productivity. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 29(3), 99-110.
- Otten L. (2001) Wet-dry composting of organic municipal solid waste: current status in Canada. *Can. J. Civ. Eng.* 28(1), 124-130.
- Ouatmane A., M.R. Provenzano, M. Hafidi et N. Senesi (2000) Compost maturity assessment using calorimetry spectroscopy and chemical analysis. *Compost Sci. Util.* 8(2), 124-134.
- Paillat, J.-M., P. Robin, M. Hassouna et P. Leterme (2005). Effet du compostage d'effluents porcins sur les émissions gazeuses et les teneurs en éléments polluants. Institut national de la recherche agronomique, Centre de recherches de Rennes, Rennes, France, 106 p.
- Paredes C., M.P. Bernal, J. Cegarra et A. Roig (2002) Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes. *Bioresource Technol.* 85(1), 1-8.

- Piggot P.J. et J.G. Coote (1976) Genetic aspects of bacterial endospore formation. *Am. Soc. Microbiol.* 4(4), 908-962.
- Poulsen O.M., N.O. Breum, N. Ebbenhøj, Å.M. Hansen, U.I. Ivens, D. Lelieveld, P. Malmros, L. Mathiassen, B.H. Nielsen, E.M. Nielsen, B. Schibye, T. Skov, E.I. Stenbæk et C.K. Wilkins (1995) Sorting and recycling of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes. *Sci. Total Environ.* 168, 33-56.
- Ranalli G., G. Bottura, P. Taddei, R. Marchetti et C. Sorlini (2001) Composting of solid and sludge residues from agricultural and food industries. Bioindicators of monitoring and compost maturity. *J. Environ. Sci. Health A.* 36(4), 415-436.
- Recyc-Québec (2003) Bilan 2002 sur la gestion des matières résiduelles au Québec. Gouvernement du Québec, Québec, QC, Canada, 45 p.
- Recyc-Québec (2002) Analyse des éléments principaux entourant la création d'un environnement favorable à l'accélération du développement de l'industrie du recyclage au Québec, Volet 1, L'enfouissement au Québec. Gouvernement du Québec, Québec, QC, Canada, 34 p.
- Redgwell R., V. Trovato, S. Merinat, D. Curti, S. Hediger et A. Manes (2003) Dietary fibre in cocoa shell: characterisation of component polysaccharides. *Food Chem.* 81(1), 103-112.
- Reinhardt T. (2002) Organic acids as a decisive limitation to process dynamics during composting of organic matter. Dans: *Microbiology of composting*. H. Insam (Éditeur), Springer-Verlag, Berlin, Allemagne, pp. 177-188.
- Richard T.L. (2004) Fundamental parameters of aerobic solid-state bioconversion processes. Dans: *Resource recovery and reuse in organic solid waste management*. P. Lens, B. Hamelers, H. Hoitink et W. Bidlingmaier (Éditeurs), IWA Publishers, Londres, Royaume-Uni, pp. 262-277.
- Roig A., M.L. Cayuela et M.A. Sanchez-Monedero (2006) An overview on olive mill wastes and their valorisation methods. *Waste Manag.* 26(9), 960-969.
- Rulkens W.H. (2004) Overview of resource recovery technologies for biowastes. Dans: *Resource recovery and reuse in organic solid waste management*. P. Lens, B. Hamelers, H. Hoitink et W. Bidlingmaier (Éditeurs), IWA Publishers, Londres, Royaume-Uni, pp. 225-261.
- Rynk R. (2000a) Contained composting systems review. *BioCycle* 41(3), 30-36.
- Rynk R. (2000b) Large-scale contained composting systems. *BioCycle* 41(4), 67-72.
- Sánchez-Monedero M.A., A. Roig, C. Paredes et M.P. Bernal (2001) Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technol.* 78(3), 301-308.
- Santé Canada (2008) Numération de colonies aérobies dans les aliments. Page Web: <http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/res-rech/analy-meth/microbio/volume2/mfhp18-01-fra.php>. Page consultée le 30 septembre 2008.
- Satisha G.C. et L. Devarajan (2007) Effect of amendments on windrow composting of sugar industry pressmud. *Waste Manag.* 27(9), 1083-1091.
- Sauvesty A. et M. Tabi (1995) Le compostage au Québec. [S.l.], Consortium sur le développement du compostage au Québec, Québec, QC, Canada, 76 p.
- Schaub S.M. et J.J. Leonard (1996) Composting: an alternative waste management option for food processing industries. *Trends Food Sci. Technol.* 7(8), 263-268.
- Schmidt O. et K. Walter (1978) Succession and activity of microorganisms in stored bagasse. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 5(1), 69-77.
- Schuchardt F. (2005) Composting of organic waste. Dans: *Environmental biotechnology; concepts and applications*. H.J.E.W. Jördening et J. Weinheim (Éditeurs), WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Allemagne, pp. 333-354.

- Sellami F., R. Jarboui, S. Hachicha, K. Medhioub et E. Ammar (2008) Co-composting of oil exhausted olive-cake, poultry manure and industrial residues of agro-food activity for soil amendment. *Bioresource Technol.* 99(5), 1177-1188.
- Seth R., R. Chandra, N. Kumar et A.K. Tyagi (2005) Utilization of composted sugar industry waste (pressmud) to improve properties of sodic soil for rice cultivation. *J. Environ. Sci. Health* 47(3), 212-217.
- Shammas N.K. et L.K. Wang (2007) Biosolids composting. Dans: *Handbook of environmental engineering*. L.K. Wang (Éditeur), Humana Press, New York, NY, pp. 645-687.
- Sigsgaard T., P. Malmros, L. Nersting et C. Petersen (1994) Respiratory disorders and atopy in Danish refuse workers. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 149, 1407-1412.
- Stabnikova O., H.B. Ding, J.H. Tay et J.Y. Wang (2005) Biotechnology for aerobic conversion of food waste into organic fertilizer. *Waste Manag. Res.* 23(1), 39-47.
- Stentiford E.I. (1996) Composting control: principles and practice. Dans: *The sciences of composting*. M.S. De Bertoldi, P. Lemmes, B. Papi et T. Glasgow (Éditeurs), Blackie Academic and Professional, Londres, Royaume-Uni, pp. 49-59.
- Strom P.F. (1985) Effect of temperature on bacterial species diversity in thermophilic solid-waste composting. *Appl. Environ. Microbiol.* 50(4), 899-905.
- Stuetz R. et F.B. Frechen (2001) Odours in wastewater treatment. Measurement, modelling and control. IWA Publishing, Alliance House, Londres, Royaume-Uni. 456 p.
- Sundberg C. et H. Jonsson (2005) Process inhibition due to organic acids in fed-batch composting of food waste - influence of starting culture. *Biodegradation* 16(3), 205-213.
- Sung M. et W.F. Ritter (2008) Food waste composting with selected paper products. *Compost Sci. Util.* 16(1), 36-42.
- Tang J.C., Y. Inoue, T. Yasuta, S. Yoshida et A. Katayama (2003) Chemical and microbial properties of various compost products. *Soil Sci. Plant Nutr.* 49(2), 273-280.
- Tang C.S. et J.A.C. Waiss (1978) Short-chain fatty acids as growth inhibitors in decomposing wheat straw. *J. Chem. Ecol.* 4(2), 225-232.
- TEG (2008) The TEG silo cage in-vessel composting system. Page Web: [http://www.environmental-expert.com/STSE\\_resulteach\\_product.aspx?cid=31046&idprofile=19020&idproduct=55694](http://www.environmental-expert.com/STSE_resulteach_product.aspx?cid=31046&idprofile=19020&idproduct=55694). Page consultée le 24 octobre 2008.
- Thambirajah J.J., M.D. Zulkali et M.A. Hashim (1995) Microbiological and biochemical changes during the composting of oil palm empty-fruit-bunches. Effect of nitrogen supplementation on the substrate. *Bioresource Technol.* 52(2), 133-144.
- Thorn J., L. Beijer et R. Rylander (1998) Airways inflammation and glucan exposure among household waste collectors. *Am. J. Ind. Med.* 33, 463-470.
- Tisdell S.E., et Breslin, V.T. 1995. Characterization and leaching of elements from municipal solid waste compost. *J. Environ. Qual.* 24, 827-833.
- Trottier J., J-L Allard et Y. Cadotte (2008) La gestion des matières résiduelles. Assemblée nationale du Québec, Commission des transports et de l'environnement. Québec, QC. 10 p.
- Tsichii A., T. Suzuki et K. Takeda (1985) Microbial degradation of natural rubber vulcanizates. *Appl. Environ. Microbiol.* 50(4), 965-970.
- Tuomela M., M. Vikman, A. Hatakka et M. Itavaara (2000) Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technol.* 72(2), 169-183.
- USEPA (1999) Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. EPA/625/R-92/013, United States Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, Washington, DC, 177 p.

- USEPA (1979) Process design manual for sludge treatment and disposal. EPA625/1-79-001, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC. 81 p.
- van Bochove E., D. Couillard et M.C. Nolin (1995) Characterization of the composting stages by a multivariate-analysis – application to the nitrogen-cycle. *Environ. Technol.* 16(10), 929-941.
- van Tongeren M., L. van Amelsfoort et D. Heederik (1997) Exposure to organic dusts, endotoxins and microorganisms in the municipal waste industry. *Int. J. Ind. Med.* 33, 384-391.
- Vermitech (2008) Introduction to the Vermitech system. Page Web: [http://www.vermitech.com/sys\\_fr.htm](http://www.vermitech.com/sys_fr.htm). Page consultée le 24 octobre 2008.
- Villeneuve C., C. Villeneuve et P.L. Dessureault (2008) Guide - mise en œuvre d'un programme de collecte de matières compostables pour la production de compost, 42 p.
- Walker L.P., T.D. Nock, J.M. Gossett et J.S. VanderGheynst (1999) The role of periodic agitation and water addition in managing moisture limitations during high-solids aerobic decomposition. *Proc. Biochem.* 34(6-7), 601-612.
- Warman, P. R. (2001). The long-term vegetable production experiment: plant growth and soil fertility comparisons between fertilizer and compost-amended soils. Department of Environmental Sciences. Nova Scotia Agricultural College, Truro, Nouvelle-Écosse, Canada, 12 p.
- Warman, P.R. et K.A. Havard (1998) Yield, vitamin and mineral contents of organically and conventionally grown potatoes and sweet corn. *Agric. Ecosys. Environ.* 68, 207-216.
- Warman, P.R. et K.A. Havard (1996) Yield, vitamin and mineral content of four vegetables grown with either composted manure or conventional fertilizer. *J. Veg. Crop Prod.* 2(1), 13-25.
- WERLI (2006a) Solvita ammonia test. Instruction for use. (version 5.0 update). Woods End Research Laboratory Incorporated, Mt Vernon, ME.
- WERLI (2006b) Solvita carbon dioxide test. Instruction for use. (version 5.0 update). Woods End Research Laboratory Incorporated, Mt Vernon, ME.
- WERLI (2005) Dewar self-heating test. Instruction for use (4th revised edition). Woods End Research Laboratory Incorporated, Mt Vernon, ME.
- Wilson B.G., K. Haralampides et S. Levesque (2004) Stormwater runoff from open windrow composting facilities. *J. Environ. Eng. Sci.* 3(6), 537-540.
- Wong J.W.C. et M. Fang (2000) Effects of lime addition on sewage sludge composting process. *Water Res.* 34(15), 3691-3698.
- Wouters I.M., H. S.K.M., P. Kleppe, G. Doekes, J. Douwes, C. Peretz et D. Heederik (2002) Upper airway inflammation and respiratory symptoms in domestic waste collectors. *Occup. Environ. Med.* 59, 106–112.
- Wu L., L.Q. Ma et G.A. Martinez (2000) Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost. *J. Environ. Qual.* 29(2), 424-249.
- Zucconi F., M. Forte, A. Monaco et M. de Bertoldi (1981) Biological evaluation of compost maturity. *BioCycle* 22(2), 27–29.

## ANNEXE A. DISPOSITION DES PARCELLES

**Tableau 36 Disposition des parcelles pour l'orge**

| <b>4<sup>ième</sup><br/>répétition</b> | <b>3<sup>ième</sup><br/>répétition</b> | <b>2<sup>ième</sup><br/>répétition</b> | <b>1<sup>ère</sup><br/>répétition</b> |
|--|--|--|---------------------------------------|
| C6                                     | C6                                     | C4                                     | E50                                   |
| E25                                    | E25                                    | E25                                    | C4                                    |
| CA                                     | C1                                     | E100                                   | CA                                    |
| E100                                   | E150                                   | E150                                   | C6                                    |
| E150                                   | C3                                     | C1                                     | C3                                    |
| E50                                    | CA                                     | C3                                     | E0                                    |
| C3                                     | E0                                     | C6                                     | E25                                   |
| C1                                     | C4                                     | E0                                     | E150                                  |
| C4                                     | E50                                    | CA                                     | C1                                    |
| E0                                     | E100                                   | E50                                    | E100                                  |

**Tableau 37 Disposition des parcelles de lin**

| <b>4<sup>ième</sup><br/>répétition</b> | <b>3<sup>ième</sup><br/>répétition</b> | <b>2<sup>ième</sup><br/>répétition</b> | <b>1<sup>ère</sup><br/>répétition</b> |
|--|--|--|---------------------------------------|
| E150                                   | E25                                    | C3                                     | E150                                  |
| C4                                     | C4                                     | E25                                    | E50                                   |
| CA                                     | E50                                    | E150                                   | E25                                   |
| E100                                   | C3                                     | E100                                   | E100                                  |
| E0                                     | E150                                   | E0                                     | C4                                    |
| C3                                     | C1                                     | C1                                     | CA                                    |
| E50                                    | C6                                     | CA                                     | C3                                    |
| C6                                     | E100                                   | C4                                     | C1                                    |
| C1                                     | CA                                     | C6                                     | E0                                    |
| E25                                    | E0                                     | E50                                    | C6                                    |



**ANNEXE B. QUANTITÉS DE CHAQUE ENGRAIS MINÉRAL MISES PAR  
PARCELLE**

**Tableau 38 Besoins en engrais pour l'orge (kg ha<sup>-1</sup>)**

|      | <b>34-0-0</b> | <b>0-46-0</b> | <b>18-46-0</b> | <b>0-0-60</b> |
|------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| E0   | 0             | 87            | 0              | 83            |
| E25  | 12            | 0             | 87             | 83            |
| E50  | 74            | 0             | 87             | 83            |
| E100 | 189           | 0             | 87             | 83            |
| E150 | 307           | 0             | 87             | 83            |

**Tableau 39 Besoins en engrais pour le lin (kg ha<sup>-1</sup>)**

|      | <b>34-0-0</b> | <b>0-46-0</b> | <b>18-46-0</b> | <b>0-0-60</b> |
|------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| E0   | 0             | 65            | 0              | 33            |
| E25  | 0             | 0             | 65             | 33            |
| E50  | 39            | 0             | 65             | 33            |
| E100 | 113           | 0             | 65             | 33            |
| E150 | 186           | 0             | 65             | 33            |

Engrais utilisés:

- 34-0-0: nitrate d'ammomium (50% de l'azote est sous forme NO<sub>3</sub> et 50% sous forme NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)
- 0-46-0: superphosphate triple
- 18-46-0: phosphate di-ammonium (l'azote est sous forme NH<sub>3</sub>)
- 0-0-60: muriate de potassium



# ANNEXE C. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CIMIQUES DES COPRODUITS ÉCHANTILLONNÉS AUX USINES DE BISCUITS LECLERC

**Tableau 40** Caractéristiques physico-chimiques des coproduits échantillonnés aux usines de Biscuits Leclerc

| Paramètres                                | Méthodes   | Unités                 | Norme compost AA | Familles |                   |                         |          |                   |
|---|--|------------------------|------------------|----------|-------------------|-------------------------|----------|-------------------|
|   |  |                        |                  | Biscuits | Boues biologiques | Boues physico-chimiques | Céréales | Écailles de cacao |
| <b>Production</b>                         |  | t/an                   |                  | 288      | 685               | 624                     | 1152     | 1460              |
| <b>Proportion</b>                         |  | %                      |                  | 6.8      | 16.3              | 14.8                    | 27.4     | 34.7              |
| <b>Caractéristiques physico-chimiques</b> |  |                        |                  |          |                   |                         |          |                   |
| Solides totaux (ST)                       | Method A - ASTM D 2974 ou Method I - AOAC 967.03 | % (p p <sup>-1</sup> ) | ≥ 35             | 93.0     | 17.0              | 40.2                    | 87.6     | 98.8              |
| Humidité                                  | Method A - ASTM D 2974 ou Method I - AOAC 967.03 | % (p p <sup>-1</sup> ) | ≤ 65             | 7.0      | 83.0              | 59.8                    | 12.4     | 1.2               |
| Porosité                                  |  | %                      |                  |          |                   |                         |          |                   |
| Densité en vrac                           |  |                        |                  | 0.20     | 0.34              | 1.16                    | 0.30     | 0.12              |
| pH  |  | -                      |                  |          |                   |                         |          |                   |
| Carbone total (C) (NCS)                   |  | g kg <sup>-1</sup>     |                  | 479      | 464               | 599                     | 440      | 436               |
| Carbone organique total (C.O.)            |  | g kg <sup>-1</sup>     |                  |          |                   |                         |          |                   |
| Matière organique totale (M.O.)           | Method C - ASTM D 2974 ou AOAC 967.05            | g kg <sup>-1</sup>     | ≥ 500            |          |                   |                         |          |                   |
| <b>Teneur en corps étrangers</b>          |  |                        |                  |          |                   |                         |          |                   |
| Corps étrangers tranchants                | CAN/BNQ 0413-210                                 | (nb > 3 mm)            | 0                |          |                   |                         |          |                   |
| Corps étrangers                           | CAN/BNQ 0413-210                                 | (nb > 12.5 mm/500 mL)  | 0                |          |                   |                         |          |                   |
| Corps étrangers                           | CAN/BNQ 0413-210                                 | % (p p <sup>-1</sup> ) | ≤ 0.01           |          |                   |                         |          |                   |
| <b>Teneur en éléments nutritifs</b>       |  |                        |                  |          |                   |                         |          |                   |
| Azote total (N) (NCS)                     |  | g kg <sup>-1</sup>     |                  | 10.30    | 28.00             | 11.70                   | 13.01    | 25.92             |
| Azote total Kjeldahl (NTK)                |  | g kg <sup>-1</sup>     |                  |          |                   |                         |          |                   |
| Rapport C/N                               |  | -                      |                  | 46.54    | 16.57             | 51.18                   | 36.25    | 16.82             |
| Soufre (S) (NCS)                          |  | g kg <sup>-1</sup>     |                  | 0.09     | 0.27              | 0.11                    | 0.10     | 0.15              |
| Phosphore (P) (ICP-AES)                   |  | g kg <sup>-1</sup>     |                  | 0.87     | 0.03              | 1.12                    | 2.06     | 1.45              |
| Calcium (Ca) (ICP-AES)                    |  | g kg <sup>-1</sup>     |                  | 0.41     | 0.11              | 0.58                    | 0.85     | 1.87              |
| Magnésium (Mg) (ICP-AES)                  |  | g kg <sup>-1</sup>     |                  | 0.20     | 0.05              | 0.06                    | 0.69     | 2.29              |
| Sodium (Na) (ICP-AES)                     |  | g kg <sup>-1</sup>     |                  | 1.73     | 0.19              | 1.61                    | 4.78     | 0.62              |
| Potassium (K) (ICP-AES)                   |  | g kg <sup>-1</sup>     |                  | 1.21     | 0.01              | 0.30                    | 1.92     | 2.29              |
| <b>Teneur en éléments traces</b>          |  |                        |                  |          |                   |                         |          |                   |
| Aluminium (Al)                            |  | mg kg <sup>-1</sup>    |                  | 26.003   | 4.620             | 171.370                 | 10.755   | 85.160            |
| Arsenic (As)                              | ICP-AES (EPA 6010B), Digestion (EPA 3050 B)      | mg kg <sup>-1</sup>    | ≤ 13.0           | 0.465    | 0.120             | 0.560                   | 1.039    | 0.210             |
| Cadmium (Cd)                              | ICP-AES (EPA 6010B), Digestion (EPA 3050 B)      | mg kg <sup>-1</sup>    | ≤ 3.0            | 2.172    | 0.010             | 0.210                   | 0.559    | 0.130             |
| Chromium (Cr)                             | ICP-AES (EPA 6010B), Digestion (EPA 3050 B)      | mg kg <sup>-1</sup>    | ≤ 210            | 1.236    | 0.020             | 12.210                  | 2.179    | 5.290             |
| Cobalt (Co)                               | ICP-AES (EPA 6010B), Digestion (EPA 3050 B)      | mg kg <sup>-1</sup>    | ≤ 34.0           | 0.020    | 0.020             | 0.020                   | 0.035    | 0.020             |
| Cuivre (Cu)                               | ICP-AES (EPA 6010B), Digestion (EPA 3050 B)      | mg kg <sup>-1</sup>    | ≤ 400            | 5.511    | 1.570             | 108.760                 | 6.370    | 22.500            |
| Fer (Fe)                                  |  | mg kg <sup>-1</sup>    |                  | 78.889   | 26.230            | 4314.000                | 172.634  | 434.800           |
| Manganèse (Mn)                            |  | mg kg <sup>-1</sup>    |                  | 5.195    | 19.680            | 12.870                  | 20.367   | 0.270             |
| Mercury (Hg)                              | ICP-AES (EPA 7471 A)                             | mg kg <sup>-1</sup>    | ≤ 0.8            |          |                   |                         |          |                   |
| Molybdène (Mo)                            | ICP-AES (EPA 6010B), Digestion (EPA 3050 B)      | mg kg <sup>-1</sup>    | ≤ 5.0            | 0.410    | 0.780             | 2.120                   | 0.673    | 0.019             |
| Nickel (Ni)                               | ICP-AES (EPA 6010B), Digestion (EPA 3050 B)      | mg kg <sup>-1</sup>    | ≤ 62             | 0.636    | 0.020             | 5.910                   | 0.998    | 5.870             |
| Plomb (Pb)                                | ICP-AES (EPA 6010B), Digestion (EPA 3050 B)      | mg kg <sup>-1</sup>    | ≤ 150            | 1.315    | 3.085             | 5.470                   | 0.792    | 2.720             |
| Sélénium (Se)                             | ICP-AES (EPA 6010B), Digestion (EPA 3050 B)      | mg kg <sup>-1</sup>    | ≤ 2.0            | 0.045    | 0.020             | 0.020                   | 0.184    | 0.470             |
| Zinc (Zn)                                 | ICP-AES (EPA 6010B), Digestion (EPA 3050 B)      | mg kg <sup>-1</sup>    | ≤ 700            | 18.892   | 1.580             | 34.010                  | 31.627   | 33.750            |

| <b>Céréales</b>                           |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
|---|-----------------|------------------|----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------|---------------|
| <b>Paramètres</b>                         | <b>Riz cuit</b> | <b>Riz séché</b> | <b>Mais non cuit</b> | <b>Riz croustillant (Rice Crispy)</b> | <b>Flocons de maïs avec raisins</b> | <b>Poussières de flocons de maïs</b> | <b>Flocons d'avoine</b> | <b>Riz Leclerc extrusion</b> | <b>Riz General Mills extrusion</b> | <b>Avoines (Mix Cheerios)</b> | <b>Son de blé (All Bran)</b> | <b>Barres tendres</b> | <b>Prépesage</b> | <b>Global</b> |
| <b>Production</b>                         | 8.5             | 8.5              | 8.5                  | 8.5                                   | 8.5                                 | 8.5                                  | 6.0                     | 6.5                          | 6.5                                | 6.5                           | 6.5                          | 17.0                  | 0.0              | 100.0         |
| <b>Proportion</b>                         | 8.5             | 8.5              | 8.5                  | 8.5                                   | 8.5                                 | 8.5                                  | 6.0                     | 6.5                          | 6.5                                | 6.5                           | 6.5                          | 17.0                  | 0.0              | 100.0         |
| <b>Caractéristiques physico-chimiques</b> |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| Solides totaux (ST)                       | 82.3            | 92.0             | 41.3                 | 97.8                                  | 89.1                                | 97.9                                 | 94.7                    | 96.5                         | 95.5                               | 98.3                          | 70.9                         | 93.8                  | 92.1             | 87.6          |
| Humidité                                  | 17.7            | 8.0              | 58.8                 | 2.2                                   | 10.9                                | 2.1                                  | 5.3                     | 3.5                          | 4.5                                | 1.7                           | 29.1                         | 6.2                   | 8.0              | 12.4          |
| Porosité                                  |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| Densité en vrac                           |                 | 0.79             |                      | 0.10                                  | 0.38                                | 0.34                                 | 0.48                    | 0.16                         | 0.24                               | 0.31                          | 0.35                         | 0.40                  |                  | 0.30          |
| pH  |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| Carbone total (C) (NCS)                   | 428             | 428              | 428                  | 434                                   | 434                                 | 439                                  | 473                     | 433                          | 445                                | 439                           | 433                          | 457                   | 444              | 440           |
| Carbone organique total (C.O.)            |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| Matière organique totale (M.O.)           |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| <b>Teneur en corps étrangers</b>          |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| Corps étrangers tranchants                |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| Corps étrangers                           |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| Corps étrangers                           |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| <b>Teneur en éléments nutritifs</b>       |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| Azote total (N) (NCS)                     | 12.67           | 12.67            | 12.43                | 11.17                                 | 10.90                               | 11.70                                | 13.49                   | 15.08                        | 14.74                              | 12.52                         | 27.88                        | 9.14                  | 13.53            | 13.01         |
| Azote total Kjeldahl (NtK)                |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| Rapport C/N                               | 33.76           | 33.76            | 34.39                | 38.84                                 | 39.84                               | 37.50                                | 35.03                   | 28.71                        | 30.16                              | 35.02                         | 15.54                        | 49.98                 | 32.80            | 36.25         |
| Soufre (S) (NCS)                          | 0.10            | 0.10             | 0.09                 | 0.09                                  | 0.08                                | 0.09                                 | 0.10                    | 0.12                         | 0.12                               | 0.09                          | 0.19                         | 0.07                  | 0.08             | 0.10          |
| Phosphore (P) (ICP-AES)                   | 1.55            | 1.55             | 0.58                 | 1.00                                  | 0.58                                | 0.61                                 | 3.92                    | 2.00                         | 1.86                               | 1.75                          | 9.58                         | 1.96                  | 1.66             | 2.06          |
| Calcium (Ca) (ICP-AES)                    | 0.43            | 0.43             | 0.21                 | 0.18                                  | 0.21                                | 0.10                                 | 0.52                    | 4.35                         | 1.77                               | 1.66                          | 0.80                         | 0.77                  | 0.86             | 0.85          |
| Magnésium (Mg) (ICP-AES)                  | 0.46            | 0.46             | 0.18                 | 0.17                                  | 0.14                                | 0.17                                 | 0.99                    | 0.61                         | 0.59                               | 0.50                          | 4.38                         | 0.57                  | 0.73             | 0.69          |
| Sodium (Na) (ICP-AES)                     | 8.20            | 8.20             | 0.00                 | 4.54                                  | 8.20                                | 6.41                                 | 2.98                    | 3.60                         | 4.17                               | 4.67                          | 7.08                         | 1.82                  | 0.96             | 4.78          |
| Potassium (K) (ICP-AES)                   | 1.05            | 1.05             | 0.76                 | 0.86                                  | 0.75                                | 0.80                                 | 3.20                    | 1.70                         | 1.74                               | 1.46                          | 9.66                         | 1.98                  | 4.08             | 1.92          |
| <b>Teneur en éléments traces</b>          |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| Aluminium (Al)                            | 5.570           | 5.570            | 8.230                | 3.450                                 | 16.840                              | 7.180                                | 6.760                   | 22.670                       | 15.130                             | 12.650                        | 9.730                        | 14.450                | 41.940           | 10.755        |
| Arsenic (As)                              | 0.370           | 0.370            | 5.560                | 0.610                                 | 0.055                               | 0.066                                | 0.251                   | 1.835                        | 0.430                              | 0.001                         | 0.290                        | 1.530                 | 0.009            | 1.039         |
| Cadmium (Cd)                              | 0.080           | 0.080            | 0.030                | 0.020                                 | 0.130                               | 0.050                                | 0.060                   | 0.030                        | 0.030                              | 0.030                         | 0.150                        | 2.980                 | 3.270            | 0.559         |
| Chrome (Cr)                               | 0.620           | 0.620            | 7.560                | 1.820                                 | 0.730                               | 0.650                                | 0.630                   | 3.840                        | 0.800                              | 1.330                         | 4.820                        | 2.410                 | 1.600            | 2.179         |
| Cobalt (Co)                               | 0.020           | 0.020            | 0.020                | 0.020                                 | 0.020                               | 0.020                                | 0.020                   | 0.020                        | 0.020                              | 0.020                         | 0.110                        | 0.240                 | 0.035            | 0.035         |
| Cuivre (Cu)                               | 21.020          | 21.020           | 5.480                | 4.740                                 | 1.960                               | 1.370                                | 3.700                   | 4.830                        | 2.820                              | 3.760                         | 10.820                       | 0.015                 | 5.750            | 6.370         |
| Fer (Fe)                                  | 153.700         | 153.700          | 311.600              | 87.030                                | 413.800                             | 323.270                              | 44.440                  | 57.640                       | 26.230                             | 174.300                       | 161.750                      | 117.790               | 226.030          | 172.634       |
| Manganèse (Mn)                            | 15.770          | 15.770           | 4.310                | 13.670                                | 2.780                               | 2.500                                | 31.730                  | 19.860                       | 23.640                             | 13.280                        | 110.000                      | 17.440                | 19.680           | 20.367        |
| Mercuré (Hg)                              |                 |                  |                      |                                       |                                     |                                      |                         |                              |                                    |                               |                              |                       |                  |               |
| Molybdène (Mo)                            | 0.990           | 0.990            | 0.180                | 1.080                                 | 0.100                               | 0.165                                | 0.590                   | 1.160                        | 0.960                              | 0.540                         | 1.520                        | 0.400                 | 0.290            | 0.673         |
| Nickel (Ni)                               | 0.520           | 0.520            | 1.110                | 0.940                                 | 0.930                               | 0.410                                | 1.130                   | 1.180                        | 0.430                              | 1.400                         | 1.660                        | 1.470                 | 1.140            | 0.998         |
| Plomb (Pb)                                | 0.610           | 0.610            | 0.640                | 0.660                                 | 0.670                               | 0.670                                | 0.740                   | 0.730                        | 0.610                              | 1.760                         | 0.510                        | 1.140                 | 2.190            | 0.792         |
| Sélénium (Se)                             | 0.020           | 0.020            | 0.020                | 0.020                                 | 0.020                               | 0.020                                | 0.020                   | 0.020                        | 0.020                              | 0.940                         | 1.620                        | 0.020                 | 0.420            | 0.184         |
| Zinc (Zn)                                 | 33.520          | 33.520           | 11.200               | 24.270                                | 22.020                              | 12.070                               | 43.150                  | 30.610                       | 27.750                             | 27.500                        | 105.517                      | 29.340                | 23.150           | 31.627        |

| Paramètres                                | Boues physico-chim. | Boues biologiques | Biscuits         |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         | Global |
|---|---------------------|-------------------|------------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|------------|-------------------------|--------|
|   |                     |                   | Pâtes à biscuits | Biscuits chocolat | Biscuits ronds | Barres aux fruits | Gaufrettes sans crème | Gaufrettes avec crème | Quatro fudge | Thé social | Biscuits ronds chocolat |        |
| <b>Production</b>                         |                     |                   | 0.0              | 2.0               | 4.0            | 4.0               | 38.0                  | 38.0                  | 2.0          | 10.0       | 2.0                     | 100.0  |
| <b>Caractéristiques physico-chimiques</b> |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| Solides totaux (ST)                       | 40.2                | 17.0              | 82.0             | 98.5              | 95.1           | 83.4              | 86.8                  | 97.9                  | 97.7         | 98.1       | 97.6                    | 93.0   |
| Humidité                                  | 59.8                | 83.0              | 18.1             | 1.5               | 4.9            | 16.6              | 13.3                  | 2.1                   | 2.3          | 1.9        | 2.4                     | 7.0    |
| Porosité                                  |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| Densité en vrac                           | 1.16                | 0.34              |                  | 0.41              | 0.29           | 0.46              | 0.07                  | 0.26                  | 0.39         | 0.25       | 0.41                    | 0.20   |
| pH  |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| Carbone total (C) (NCS)                   | 599                 | 464               | 462              | 481               | 481            | 433               | 448                   | 516                   | 511          | 468        | 499                     | 479    |
| Carbone organique total (C.O.)            |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| Matière organique totale (M.O.)           |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| <b>Teneur en corps étrangers</b>          |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| Corps étrangers tranchants                |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| Corps étrangers                           |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| Corps étrangers                           |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| <b>Teneur en éléments nutritifs</b>       |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| Azote total (N) (NCS)                     | 11.70               | 28.00             | 11.07            | 11.00             | 8.44           | 6.03              | 14.98                 | 5.39                  | 10.87        | 12.91      | 12.40                   | 10.30  |
| Azote total Kjeldahl (NTK)                |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| Rapport C/N                               | 51.18               | 16.57             | 41.73            | 43.70             | 56.95          | 71.86             | 29.88                 | 95.66                 | 46.98        | 36.24      | 40.25                   | 46.54  |
| Soufre (S) (NCS)                          | 0.11                | 0.27              | 0.08             | 0.10              | 0.06           | 0.04              | 0.13                  | 0.05                  | 0.08         | 0.09       | 0.09                    | 0.09   |
| Phosphore (P) (ICP-AES)                   | 1.12                | 0.03              | 0.97             | 0.42              | 0.80           | 1.31              | 1.17                  | 0.51                  | 1.43         | 0.85       | 1.51                    | 0.87   |
| Calcium (Ca) (ICP-AES)                    | 0.58                | 0.11              | 0.26             | 0.23              | 0.21           | 2.27              | 0.40                  | 0.17                  | 0.84         | 0.22       | 2.62                    | 0.41   |
| Magnésium (Mg) (ICP-AES)                  | 0.06                | 0.05              | 0.17             | 0.18              | 0.15           | 0.23              | 0.24                  | 0.12                  | 0.68         | 0.17       | 0.48                    | 0.20   |
| Sodium (Na) (ICP-AES)                     | 1.61                | 0.19              | 3.41             | 0.64              | 3.88           | 3.94              | 1.32                  | 0.93                  | 3.05         | 4.44       | 2.35                    | 1.73   |
| Potassium (K) (ICP-AES)                   | 0.30                | 0.01              | 1.07             | 0.87              | 0.94           | 1.32              | 1.61                  | 0.76                  | 3.41         | 0.97       | 2.08                    | 1.21   |
| <b>Teneur en éléments traces</b>          |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| Aluminium (Al)                            | 171.370             | 4.620             | 7.370            | 0.940             | 9.590          | 16.380            | 49.600                | 7.770                 | 64.800       | 13.700     | 24.900                  | 26.003 |
| Arsenic (As)                              | 0.560               | 0.120             | 0.140            | 0.064             | 0.011          | 4.770             | 0.468                 | 0.180                 | 0.083        | 0.240      | 0.100                   | 0.465  |
| Cadmium (Cd)                              | 0.210               | 0.010             | 0.080            | 0.020             | 0.140          | 0.400             | 4.900                 | 0.040                 | 3.470        | 1.230      | 4.040                   | 2.172  |
| Chrome (Cr)                               | 12.210              | 0.020             | 0.600            | 0.020             | 0.630          | 4.960             | 1.630                 | 0.650                 | 1.890        | 0.840      | 1.190                   | 1.236  |
| Cobalt (Co)                               | 0.020               | 0.020             | 0.020            | 0.020             | 0.020          | 0.020             | 0.020                 | 0.020                 | 0.020        | 0.020      | 0.020                   | 0.020  |
| Cuivre (Cu)                               | 108.760             | 1.570             | 23.870           | under             | 2.550          | 19.840            | 5.190                 | 5.560                 | 11.070       | 2.250      | 4.180                   | 5.511  |
| Fer (Fe)                                  | 4314.000            | 26.230            | 55.140           | 22.040            | 75.800         | 55.000            | 129.850               | 38.900                | 130.120      | 53.100     | 80.960                  | 78.889 |
| Manganèse (Mn)                            | 12.870              | 19.680            | 5.440            | 2.200             | 4.510          | 6.240             | 7.290                 | 2.970                 | 8.990        | 5.190      | 8.360                   | 5.195  |
| Mercuré (Hg)                              |                     |                   |                  |                   |                |                   |                       |                       |              |            |                         |        |
| Molybdène (Mo)                            | 2.120               | 0.780             | 0.420            | 0.180             | 0.370          | 0.320             | 0.610                 | 0.260                 | 0.260        | 0.410      | 0.300                   | 0.410  |
| Nickel (Ni)                               | 5.910               | 0.020             | 0.310            | 0.020             | 1.010          | 0.760             | 0.740                 | 0.320                 | 1.670        | 1.140      | 0.769                   | 0.636  |
| Plomb (Pb)                                | 5.470               | 3.085             | 1.350            | 0.840             | 0.390          | 0.530             | 2.380                 | 0.310                 | 6.600        | 1.080      | 0.800                   | 1.315  |
| Sélénium (Se)                             | 0.020               | 0.020             | 0.020            | 0.960             | 0.020          | 0.369             | 0.020                 | 0.020                 | 0.170        | 0.020      | 0.430                   | 0.045  |
| Zinc (Zn)                                 | 34.010              | 1.580             | 30.390           | 9.660             | 29.300         | 31.300            | 24.800                | 12.500                | 26.600       | 13.600     | 20.100                  | 18.892 |

| Paramètres                                | Ecailles<br>de cacao | Rejets de dépoussiéreurs   |                          |                  |                   |                        |
|---|----------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|-------------------|------------------------|
|   |                      | Mélange<br>céréales-fruits | Dépoussiéreur<br>général | Rejet<br>séchoir | Rejet<br>grilleur | Dépoussiéreur<br>sucre |
| <b>Production</b>                         |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| <b>Proportion</b>                         |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| <b>Caractéristiques physico-chimiques</b> |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| Solides totaux (ST)                       | 98.8                 | 96.2                       | 94.7                     | 89.4             | 92.9              | 99.1                   |
| Humidité                                  | 1.2                  | 3.8                        | 5.3                      | 10.6             | 7.1               | 0.9                    |
| Porosité                                  |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| Densité en vrac                           | 0.12                 |                            |                          |                  |                   |                        |
| pH  |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| Carbone total (C) (NCS)                   | 436                  | 462                        | 445                      | 436              | 436               | 421                    |
| Carbone organique total (C.O.)            |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| Matière organique totale (M.O.)           |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| <b>Teneur en corps étrangers</b>          |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| Corps étrangers tranchants                |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| Corps étrangers                           |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| Corps étrangers                           |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| <b>Teneur en éléments nutritifs</b>       |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| Azote total (N) (NCS)                     | 25.92                | 27.08                      | 15.78                    | 10.59            | 17.33             | 4.63                   |
| Azote total Kjeldahl (NTK)                |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| Rapport C/N                               | 16.82                | 17.07                      | 28.17                    | 41.14            | 25.15             | 90.93                  |
| Soufre (S) (NCS)                          | 0.15                 | 0.17                       | 0.12                     | 0.08             | 0.14              | 0.05                   |
| Phosphore (P) (ICP-AES)                   | 1.45                 | 5.01                       | 2.28                     | 5.76             | 4.72              | 0.46                   |
| Calcium (Ca) (ICP-AES)                    | 1.87                 | 1.62                       | 0.57                     | 0.53             | 0.48              | 0.31                   |
| Magnésium (Mg) (ICP-AES)                  | 2.29                 | 2.05                       | 0.62                     | 2.06             | 1.52              | 0.14                   |
| Sodium (Na) (ICP-AES)                     | 0.62                 | 3.82                       | 4.43                     | 8.64             | 8.13              | 2.59                   |
| Potassium (K) (ICP-AES)                   | 2.29                 | 6.41                       | 2.21                     | 4.88             | 4.71              | 0.45                   |
| <b>Teneur en éléments traces</b>          |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| Aluminium (Al)                            | 85.160               | 14.750                     | 15.640                   | 12.850           | 15.600            | 7.050                  |
| Arsenic (As)                              | 0.210                | 0.123                      | 0.240                    | 0.198            | 0.060             |                        |
| Cadmium (Cd)                              | 0.130                | 0.050                      | 0.040                    | 0.140            | 0.160             | 0.020                  |
| Chrome (Cr)                               | 5.290                | 0.590                      | 0.630                    | 0.880            | 0.880             | 0.610                  |
| Cobalt (Co)                               | 0.020                | 0.020                      | 0.020                    | 0.020            | 0.020             | 0.020                  |
| Cuivre (Cu)                               | 22.500               | 6.690                      | 3.690                    | 5.500            | 7.660             | 1.640                  |
| Fer (Fe)                                  | 434.800              | 76.510                     | 177.630                  | 272.630          | 242.330           | 85.600                 |
| Manganèse (Mn)                            | 0.270                | 49.620                     | 43.450                   | 51.910           | 37.650            | 3.800                  |
| Mercuré (Hg)                              |                      |                            |                          |                  |                   |                        |
| Molybdène (Mo)                            | 0.019                | 0.870                      | 0.850                    | 0.600            | 0.890             | 0.150                  |
| Nickel (Ni)                               | 5.870                | 0.750                      | 0.930                    | 0.520            | 0.680             | 0.380                  |
| Plomb (Pb)                                | 2.720                | 0.530                      | 0.710                    | 0.700            | 1.630             | 0.990                  |
| Sélénium (Se)                             | 0.470                | 0.020                      | 0.020                    | 0.020            | 0.610             | 0.020                  |
| Zinc (Zn)                                 | 33.750               | 40.100                     | 43.970                   | 55.470           | 42.180            | 18.800                 |

Caractéristiques des Intrants de compostage

| Paramètres                                | Mix Corn 60/40 | Flocons de maïs | Riz General Mills | Mix granola |
|---|----------------|-----------------|-------------------|-------------|
| <b>Production</b>                         |                |                 |                   |             |
| <b>Proportion</b>                         |                |                 |                   |             |
| <b>Caractéristiques physico-chimiques</b> |                |                 |                   |             |
| Solides totaux (ST)                       | 93,5           | 91,4            | 92,2              | 90,0        |
| Humidité                                  | 6,5            | 8,6             | 7,8               | 10,0        |
| Porosité                                  |                |                 |                   |             |
| Densité en vrac                           | 0,40           | 0,15            |                   | 0,53        |
| pH  | 6,70           | 4,80            | 5,67              | 5,80        |
| Carbone total (C) (NCS)                   | 466            | 428             | 428               | 451,4       |
| Carbone organique total (C.O.)            |                |                 |                   |             |
| Matière organique totale (M.O.)           |                |                 |                   |             |
| <b>Teneur en corps étrangers</b>          |                |                 |                   |             |
| Corps étrangers tranchants                |                |                 |                   |             |
| Corps étrangers                           |                |                 |                   |             |
| Corps étrangers                           |                |                 |                   |             |
| <b>Teneur en éléments nutritifs</b>       |                |                 |                   |             |
| Azote total (N) (NCS)                     | 13,45          | 9,95            | 12,67             | 22,05       |
| Azote total Kjeldahl (NTK)                |                |                 |                   |             |
| Rapport C/N                               | 34,62          | 43,02           | 33,76             | 20,47       |
| Soufre (S) (NCS)                          | 0,12           | 0,06            | 0,10              | 0,12        |
| Phosphore (P) (ICP-AES)                   | 2,09           | 5,56            | 5,70              | 2,23        |
| Calcium (Ca) (ICP-AES)                    | 0,81           | 0,23            | 9,50              | 2,76        |
| Magnésium (Mg) (ICP-AES)                  | 0,65           | 0,14            | 0,60              | 0,69        |
| Sodium (Na) (ICP-AES)                     | 2,00           | 9,63            | 9,78              | 3,44        |
| Potassium (K) (ICP-AES)                   | 2,04           | 1,16            | 4,75              | 3,78        |
| <b>Teneur en éléments traces</b>          |                |                 |                   |             |
| Aluminium (Al)                            | 14,30          | 12,16           | 39,70             | 17,27       |
| Arsenic (As)                              | 0,31           | 0,64            | 1,12              | 0,15        |
| Cadmium (Cd)                              | 0,05           | 0,13            | 0,08              | 0,09        |
| Chrome (Cr)                               | 0,53           | 0,81            | 1,28              | 0,57        |
| Cobalt (Co)                               | 0,07           | 0,54            | 1,28              | 0,12        |
| Cuivre (Cu)                               | 2,32           | 0,02            | 47,95             | 4,05        |
| Fer (Fe)                                  | 303,23         | 656,45          | 92,30             | 134,90      |
| Manganèse (Mn)                            | 3,69           | 4,81            | 15,47             | 3,69        |
| Mercurure (Hg)                            |                |                 |                   |             |
| Molybdène (Mo)                            | 0,50           | 0,07            | 0,74              | 0,40        |
| Nickel (Ni)                               | 2,16           | 0,85            | 3,76              | 1,11        |
| Plomb (Pb)                                | 0,00           | 0,04            | 1,27              | 0,02        |
| Sélénium (Se)                             | 0,30           | 0,32            | 2,79              | 1,08        |
| Zinc (Zn)                                 | 79,16          | 43,22           | 45,65             | 62,25       |



## ANNEXE D. PHOTOS RELATIVES AUX ESSAIS AGRONOMIQUES



**Figure 57** Écailles de cacao encore apparente à la récolte



**Figure 58** Mauvaises herbes dans les parcelles d'orge



**Figure 59** Apparence des parcelles d'orge



**Figure 60** Apparence des parcelles de lin



**Figure 61** Site des essais agronomiques (lin et orge)



**ANNEXE E. TENEURS EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS ET EN MÉTAUX DU  
COMPOST ACHETÉ**

**Tableau 41 Teneurs en éléments nutritifs et en métaux du compost acheté**

| <b>Paramètres</b> | <b>Unités</b>          | <b>Compost acheté</b> |
|-------------------|------------------------|-----------------------|
| Teneur en eau     | (% p p <sup>-1</sup> ) | 42.0                  |
| C                 | (g kg <sup>-1</sup> )  | 389                   |
| N                 | (g kg <sup>-1</sup> )  | 13.3                  |
| S                 | (g kg <sup>-1</sup> )  | 2.8                   |
| P                 | (g kg <sup>-1</sup> )  | 5.19                  |
| Ca                | (g kg <sup>-1</sup> )  | 39.2                  |
| Mg                | (g kg <sup>-1</sup> )  | 3.64                  |
| Na                | (g kg <sup>-1</sup> )  | 2.03                  |
| K                 | (g kg <sup>-1</sup> )  | 5.98                  |
| Al                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 3 010                 |
| As                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1.46                  |
| Cd                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1.03                  |
| Cr                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 16.5                  |
| Co                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 2.20                  |
| Cu                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 89.4                  |
| Fe                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 6 010                 |
| Mn                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 550                   |
| Mo                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1.94                  |
| Ni                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 15.4                  |
| Pb                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 14.3                  |
| Se                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1.34                  |
| Zn                | (mg kg <sup>-1</sup> ) | 328                   |



## ANNEXE F. DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES DE LA VILLE DE TROIS-RIVIÈRES

