

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**RECHERCHE D'UN CONSORTIUM MICROBIEN POUR
COMPOSTER DES BOUES PAPETIÈRES SECONDAIRES**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ
PAR**

ZINEB BELKHEIR

**À
L'INSTITUT ARMAND-FRAPPER
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN MICROBIOLOGIE APPLIQUÉE**

NOVEMBRE 1996

3.3 La température du compostage	29
3.4 Le pH du substrat	30
3.5 Le rapport C/N	30
4. Microbiologie générale du compostage	32
4.1 Les microorganismes du compostage	32
4.2 L'ensemencement	34
MATÉRIEL ET MÉTHODES	36
1. Description du substrat	37
1.1 Provenance	37
1.2 Caractérisation et aspect physique	37
1.3 Proportion	37
2. Conditions d'utilisation lors de l'expérimentation	38
2.1 Description du composteur	38
2.2 Essai de compostage	44
2.3 Aération	44
3. Analyse microbiologique	44
3.1 Élaboration de l'inoculum	44
3.1.1 Origine des souches	44
3.1.2 Isolement des microorganismes	45
3.1.3 Sélection de souches	45
3.1.4 Préparation des cultures	46
3.1.4.1 Conservation	47
3.1.4.2 Préparation de l'inoculum	48
3.2 Numération des microorganismes durant le compostage	49
3.3 Numération de la flore cellulolytique durant le compostage	52
4. Analyse physico-chimique	53
4.1 Suivi de la température	53
4.2 Mesure de l'oxygène à l'intérieur du composteur	53
4.3 Mesure du pH	53
4.4 Détermination du pourcentage d'humidité	54
4.5 Détermination du pourcentage de matière organique et du carbone	54
4.6 Détermination du pourcentage d'azote totale	55
4.7 Détermination de la cellulose	58
4.8 Dosage de la demande chimique en oxygène (D.C.O.)	58
4.9 Analyse statistique	59
RÉSULTATS	60
1. Analyse microbiologique	61
1.1 Élaboration de l'inoculum	61
1.1.1 Isolement et sélection de microorganismes	61
1.1.2 Composition du consortium microbien	61
1.2 Numération des microorganismes durant le compostage	62

1.3 Numération de la flore cellulolytique durant le compostage	62
2. Analyse physico-chimique	82
2.1 Température - oxygène	82
2.2 Le pH	98
2.3 Humidité	98
2.4 Rapport C/N	98
2.5 Cellulose	117
2.6 Demande chimique en oxygène	122
3. Analyse statistique	122
DISCUSSION	131
1. Analyse microbiologique	132
1.1 Choix du consortium	132
1.2 Numération des microorganismes durant le compostage	133
1.3 Numération de la flore cellulolytique durant le compostage	135
2. Analyse physico-chimique	136
2.1 Température - oxygène	136
2.2 Le pH	139
2.3 Humidité	140
2.4 Rapport C/N	140
2.5 Cellulose	142
2.6 Demande chimique en oxygène	143
CONCLUSION	144
REMERCIEMENTS	147
BIBLIOGRAPHIE	150

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACPP :	Association Canadienne des Producteurs des Pâtes et Papiers
AIA :	Actinomycete Isolation Agar
AIFQ :	Association des Industries Forestières du Québec
ATCC :	American Type Culture Collection
B.N :	Bouillon nutritif
° C :	degrés Celsius
C/N :	rapport carbone sur azote
DBO :	demande biologique en oxygène
DCO :	demande chimique en oxygène
D.O. :	densité optique
g :	gramme
h :	heure
J. :	jour
Kpa :	KiloPascal
L :	litre
mg. :	milligramme
ml :	millilitre
mn. :	minute
NCASI :	National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement Incorporated
nm :	nanomètre

n° :	numéro
PCA :	Plate Count Agar
ppm. :	partie par million
p/v. :	partie par volume
RBCA :	Rose Bengal Chloramphenicol Agar
SPSS :	Statisticals Packages for Socials Sciences
t.m.s / J :	Tonne métrique sèche par jour
UFC :	unités formatrices de colonies
UV. :	ultrat violet
ug. :	microgramme
vs :	versus
% :	pourcentage

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Production Canadienne de pâtes et papiers	6
Tableau 2 :	Nombre d'usines québécoises selon les procédés de fabrication de la pâte à papier	7
Tableau 3 :	Quantité de boues papetières produites par les usines québécoises en 1990 et 1995	17
Tableau 4 :	Caractéristiques limitant l'emploi de matériaux à l'état frais	19
Tableau 5 :	Différents effets attribués au compostage	20
Tableau 6 :	Proportion des boues papetières primaires et secondaires contenues dans les différents lots ayant servi au compostage	38
Tableau 7 :	Milieux de cultures et température utilisés en fonction des souches	47
Tableau 8 :	Caractéristiques du consortium microbien	61
Tableau 9 :	Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cour du compostage (essai n°2)	63
Tableau 10 :	Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cour du compostage (essai n°3 et 4)	64
Tableau 11 :	Évolution du nombre de microorganismes cellulolytiques (log UFC/g) au cour du compostage	65
Tableau 12 :	Augmentation moyenne de la valeur de chaque paramètre causée par les différentes conditions de compostage pour la durée entière de l'expérience (Lot n° 2)	127
Tableau 13 :	Augmentation moyenne de la valeur de chaque paramètre par unité de temps selon les différentes conditions de compostage (lot n° 2)	128
Tableau 14 :	Augmentation moyenne de la valeur de chaque paramètre causée par les différentes conditions de compostage pour la durée entière de l'expérience (Lot n° 3 et 4)	129

Tableau 15 : Augmentation moyenne de la valeur de chaque paramètre par
unité de temps selon les différentes conditions de compostage
(lot n° 3 et 4) 130

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Procédé thermomécanique classique (Mc Cubbin, 1984)	10
Figure 2 :	Système typique de traitement de l'effluent (McCubbin, 1984)	15
Figure 3 :	Composteur domestique Enviro-Cycle	41
Figure 4 :	Composteur domestique Enviro-Cycle isolé avec de l'Astrofoil	43
Figure 5 :	Préparation des différentes souches servant d'inoculum	51
Figure 6 :	Schéma simplifié de l'analyse d'azote	57
Figure 7 (a, b, c) :	Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cours du compostage (lot n° 2)	67-69-71
Figure 8 (a, b, c) :	Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cours du compostage (lot n° 3 et 4)	73-75-77
Figure 9 :	Évolution de la flore cellulolytique (log UFC/g) au cours du compostage (lot n° 2)	79
Figure 10 :	Évolution de la flore cellulolytique (log UFC/g) au cours du compostage (lot n° 3 et 4)	81
Figure 11 :	Évolution de la température dans le composteur A et B (lot n° 1)	85
Figure 12 (a, b, c) :	Évolution de la température et de l'oxygène au cours du compostage (lot n° 2)	87-89-91
Figure 13 (a, b, c) :	Évolution de la température et de l'oxygène au cours du compostage (lot n° 3 et 4)	93-95-97
Figure 14 :	Évolution du pH au cours du compostage (lot n° 1)	100
Figure 15 :	Évolution du pH au cours du compostage (lot n° 2)	102
Figure 16 :	Évolution du pH au cours du compostage (lot n° 3 et 4)	104
Figure 17 :	Variation de la teneur en eau (lot n° 1)	106

Figure 18 :	Variation de la teneur en eau (lot n° 2)	108
Figure 19 :	Variation de la teneur en eau (lot n° 3 et 4)	110
Figure 20 :	Évolution du rapport C/N au cours du compostage (lot n° 1)	112
Figure 21 :	Évolution du rapport C/N au cours du compostage (lot n° 2)	114
Figure 22 :	Évolution du rapport C/N au cours du compostage (lot n° 3 et 4)	116
Figure 23 :	Dégradation de la cellulose au cours du compostage (lot n° 2)	119
Figure 24 :	Dégradation de la cellulose au cours du compostage (lot n° 3 et 4)	121
Figure 25 :	Diminution de la D.C.O au cours du compostage (lot n° 2)	124
Figure 26 :	Diminution de la D.C.O. au cours du compostage (lot n° 3 et 4)	126

SOMMAIRE

L'industrie des pâtes et papiers génère d'énormes quantités d'eaux usées qu'elle doit traiter. Les eaux usées sont traitées en deux étapes principales : les traitements primaires et secondaires. Le traitement de ces eaux usées produit des boues (primaires et secondaires), qui ne sont pas nécessairement valorisées puisqu'une forte proportion est destinée soit à l'incinération ou à l'enfouissement. Le compostage est un moyen efficace de valorisation de ces boues comme amendement pour les sols qui s'avèrent de plus en plus appauvris en matière organique. Le projet vise à composter des boues papetières et choisir des méthodes pour suivre l'évolution du processus. Pour ce faire nous nous sommes inspirés des divers travaux publiés sur les aspects fondamentaux du compostage.

Des essais ont été effectués en laboratoire à petite échelle dans des composteurs domestiques de types *Enviro-Cycle* (200 L) avec différentes proportions de boues primaires et secondaires. D'autre part pour augmenter la vitesse de dégradation, un consortium microbien composé de neuf (9) souches a été inoculé. La plupart de ces souches ont été isolées lors d'un essai préliminaire sur le compostage des boues papetières, à l'exception de deux qui proviennent de l'ATCC et qui ont été spécialement choisies pour leur capacité à dégrader des substrats lignocellulosiques. Il s'agit d'un champignon *Pleurotus ostreatus* (ATCC 58052) et d'un mélange bactérien non identifié (ATCC 31205). Le suivi de la dégradation inclut des méthodes physico-chimiques (T°, pH, rapport C/N, cellulose) et microbiologiques (numération des microorganismes du compost et de la flore cellulolytique).

Par ailleurs quelques possibilités de détermination de la maturité du compost ont été

considérées. Parmi toutes les méthodes suggérées dans la littérature, le dosage de la D.C.O. a été retenu.

Les boues secondaires en mélange avec les boues primaires dans des proportions différentes (80% et 20%), (65% et 35%) et (50% et 50%), semblent particulièrement intéressantes pour la pratique du compostage. Les expériences en laboratoire ont montré la faisabilité de composter ces boues. Celles-ci ont évolué à travers les trois phases du compostage en étant transformées en un produit stable. Compte tenu de la nature lignocellulosique des boues papetières, l'apport d'un inoculum microbien constitué de plusieurs microorganismes (parmi lesquels on compte des souches lignocellulolytiques) favorise et augmente la vitesse de dégradation du substrat (Gaur, 1979 ; Gaur et al., 1982 ; Mathur et al., 1986). Celle-ci a été évaluée par la diminution du rapport C/N et surtout par la dégradation de la cellulose. Après 42 jours de compostage des variations significatives sont relevées entre les composteurs inoculés (A et B) et le composteur non inoculé (C). Les données obtenues à partir des composteurs inoculés au début et après la phase thermophile donnent des résultats supérieurs au témoin. Les différentes souches isolées à partir des boues papetières ont permis d'augmenter les populations microbiennes déjà présentes dans le compost. Celles-ci sont à l'origine de la montée rapide de la température dans le composteur A (inoculé au début du processus de compostage). Notre substrat de départ (mélange de boues primaires et secondaires), contient une proportion élevée de cellulose (40% des composantes du bois). Par leur capacité à dégrader des substrats lignocellulosiques, le champignon *Pleurotus ostreatus* ainsi que le mélange bactérien non identifié, ont contribué à accélérer le processus de compostage. Après 42 jours de compostage, la dégradation de la cellulose est d'environ 25% dans le cas du témoin et de 55% dans les composteurs inoculés.

INTRODUCTION

L'industrie des pâtes et papiers est un des principaux secteurs d'activités économiques du Québec et du Canada. Pour l'année 1995, les bénéfices nets de l'industrie canadienne des pâtes et papiers sont estimés à quatre milliards de dollars. Selon l'AIFQ, les papetières québécoises ont récolté au moins le quart des profits. Le nombre d'employés pour le secteur papier et produits forestiers s'élève à 34 665 (Anonyme 1, 1996). C'est aussi un secteur qui génère un impact considérable sur l'environnement. En 1988, un rapport du Ministère de l'Environnement du Québec concluait que l'industrie des pâtes et papiers était le secteur exerçant la plus forte pression sur l'environnement québécois (Anonyme 2, 1995). La mobilisation et la forte pression de l'opinion publique ont fait en sorte que les considérations environnementales ont pris une importance grandissante au cours des dernières années. Ceci s'est traduit par l'imposition de lois environnementales. Par conséquent les papetières doivent se conformer aux nouvelles exigences du règlement Q-2, 5. 12, 1, Q-2, 5. 3. 01, (Grappe industrielle de l'environnement 1994) concernant la fabrication de la pâte à papier, ainsi que le rejet des effluents.

Les méthodes de gestion pour disposer des déchets de fabrique sont l'enfouissement qui représente pour l'année 1989, 67% du total, l'incinération est utilisée pour 26%, le recyclage pour 5% et le compostage des boues primaires et des résidus du bois compte pour une faible proportion (2%), (Charbonneau et al., 1990).

Cependant les deux premières méthodes sont la cible de plusieurs interrogations en ce qui concernent le risque associé à leur exploitation. À ce sujet, Murray et Richardson, (1993) de

Santé et Bien-être Social du Canada, citant les travaux de Commoner et al., (1987) et de Vogg et al., (1987), avancent que l'enfouissement et l'incinération ne devraient pas être encouragés, puisque lors de l'enfouissement des chlorophénols toxiques pourraient éventuellement atteindre les eaux de la nappe phréatique. Quant à l'incinération, elle pourrait engendrer une pollution atmosphérique due à la combustion des produits halogénés qui peut produire des dioxines et des furannes. Afin de respecter les lois environnementales, les usines de pâtes et papiers sont contraintes à implanter des systèmes de traitements secondaires qui ont eu pour conséquence d'augmenter de façon importante le tonnage de ces boues (105 105 t.m.s en 1993), (Lavallée, 1994). Selon l'AIFQ, citée par Sauvesty et Tabi, (1995), la production de boues secondaire pourrait dans un avenir rapproché être multipliée par 10.

Le compostage des boues papetières se présente comme une alternative aux méthodes traditionnelles de disposition de ces boues et constitue une avenue de valorisation. En effet, leur teneur élevée en matière organique, en azote et phosphore, ainsi que leur état fermentescible confèrent à ce substrat des propriétés intéressantes pour la pratique du compostage.

Le compost provenant du compostage des boues papetières peut être utilisé comme amendement organique pour la reconstitution de la matière organique des sols (Potvin et Cloutier, 1989 ; Campbell et al., 1991). Il peut être également utilisé comme matériel de restauration de sites perturbés (sites d'enfouissement, sites miniers, carrières etc.) ou comme

amendement sur des sols érodés et sur des terrains qui ont subi des feux de forêts ou des coupes à blanc (Sauvesty et Tabi, 1995).

Dans ce projet, nous avons vérifié la faisabilité de composter des boues papetières secondaires et également l'intérêt d'inoculer celles-ci avec un consortium microbien performant afin d'augmenter la vitesse du compostage.

REVUE DE LITTÉRATURE

1. Industrie des pâtes et papiers

1.1 Importance économique

L'industrie des pâtes et papiers est depuis fort longtemps la principale industrie manufacturière du secteur primaire au Canada et au Québec. Avec ses 142 usines de pâtes et papiers au pays, dont 42 au Québec, elle se situe au premier rang pour sa contribution à la balance commerciale du Canada et pour les salaires et traitements versés (Anonyme 1, 1995).

La pâte, le papier et les produits forestiers constituent la principale valeur d'exportation au Canada. Des 29 millions de tonnes de pâtes et papiers produits au Canada en 1995, 32,8% ont été produits par le Québec (Tableau I), soit la plus grande part de la production canadienne (AIFQ, 1995).

Tableau 1 : Production canadienne de pâtes et papiers.

Productions X 10³ tonnes					
Années	1980	1990	1993	1994	1995
Québec	6 332	7 717	8 010	8 975	9 522
Ontario	4 585	5 143	5 104	5 489	5 628
Colombie britannique	5 649	6 694	7 048	7 617	7 585
Autre province	4 022	4 620	6 325	6 104	6 296
Canada	20 588	24 174	26 487	28 185	29 031
Part du Québec de la production canadienne (%)	30,8	31,9	30,2	31,9	32,8

(AIFQ, 1995)

1.2 Procédés de fabrication

Il existe plusieurs procédés de fabrication de pâtes. C'est la façon de défibrer le bois qui les différencie les uns des autres. Le défibrage peut s'effectuer mécaniquement, chimiquement ou selon une combinaison des deux. On parle alors de pâte mécanique, chimique ou chimicomécanique.

Le défibrage mécanique à la meule est le plus vieux des procédés. C'est vers la fin des années 1950 qu'une variante a été apportée à ce procédé ce qui a donné la pâte mécanique de raffineur. Dans ce cas, les copeaux de bois sont transformés en pâte dans des raffineurs à disques simples ou doubles en rotation.

Depuis environ dix ans il y a eu des modifications importantes dans le secteur des pâtes et papiers. Les procédés mécaniques de raffineur et chimiques au bisulfite ont été graduellement remplacés par le procédé thermomécanique (PTM). Le tableau 2 présente le nombre d'usines de fabrication de pâtes pour le Québec et le type de procédé utilisé.

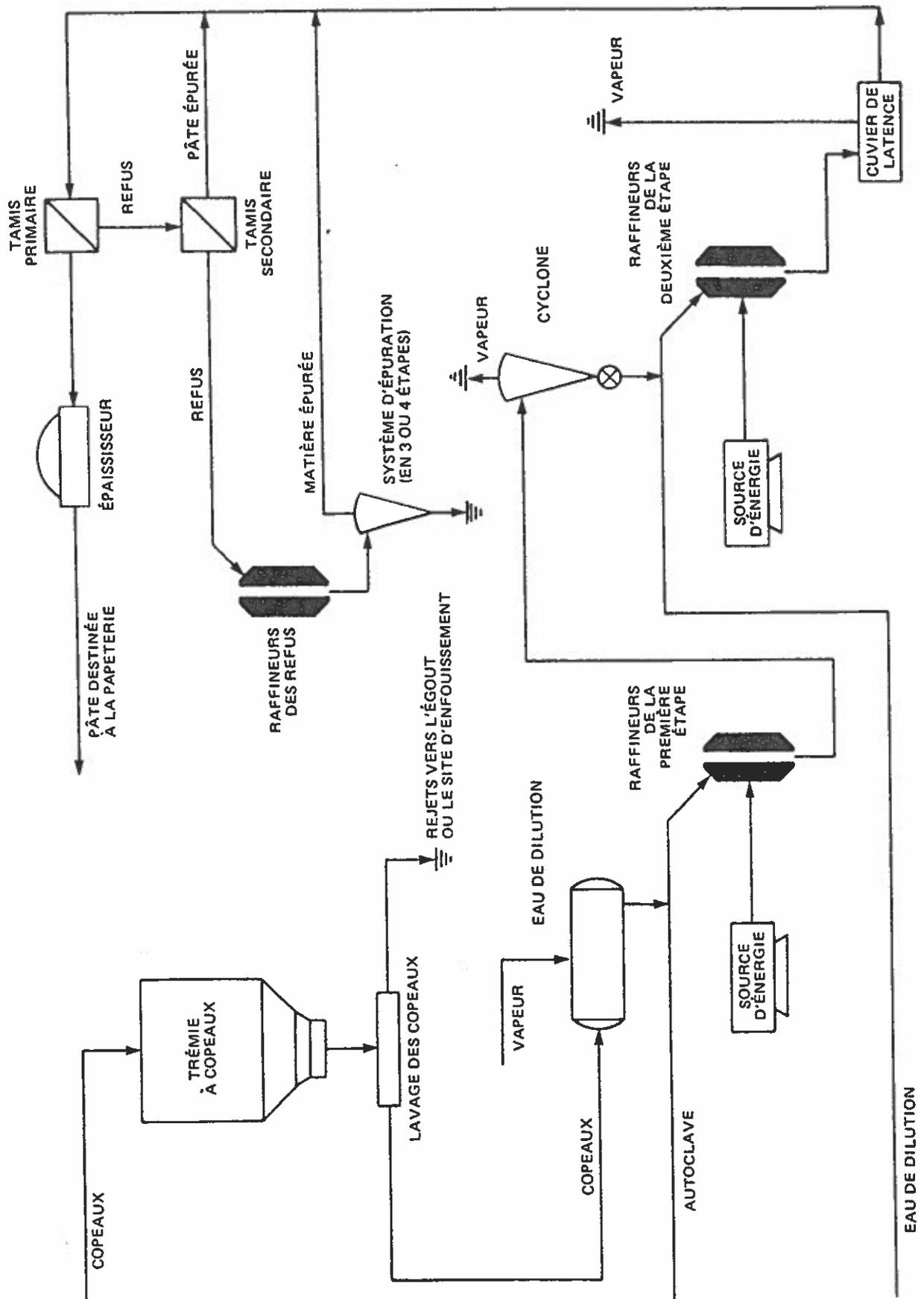
Tableau 2 : Nombre d'usines québécoises selon les procédés de fabrication de la pâte à papier.

Type d'usine	Nombre
Pâte mécanique (meule et PTM)	26
Pâte chimico-mécanique	17
Pâte chimique au sulfite	1
Pâte chimique Kraft	10

(Potvin et Bernard, 1993)

En raison de cette popularité croissante (AIFQ, 1995) notre étude a porté sur le compostage de boues produites par une usine PTM, et c'est ce procédé que nous décrivons ici dans ses grandes lignes. Lors du procédé de fabrication de pâte thermomécanique les copeaux de bois sont défibrés dans des raffineurs à disques sous une forte pression et une haute température. Le schéma des différentes étapes d'une usine PTM typique est représenté à la figure 1. Les copeaux sont ramollis à la vapeur sous pression, sans emploi de produits chimiques et sont ensuite défibrés dans deux raffineurs à disques sous pression pour assurer un meilleur défibrage. Le conditionnement à la vapeur dure normalement 3 minutes environ et se fait à une pression de 150 à 200 Kpa. La pâte brute passe ensuite à travers des tamis à grosses mailles et à mailles fines et des épurateurs centrifuges. Les tamis éliminent les impuretés de la pâte en fonction de leurs dimensions (noeuds, éclats de bois) alors que les épurateurs centrifuges les éliminent en fonction de leurs différences de densité (écorce, sable, particules abrasives). Une fois que la pâte est épurée c'est-à-dire lorsqu'elle ne contient que les fibres voulues, elle est acheminée dans un épaisseur à gravité. La concentration de la pâte passe de 0,5% à 3,4% (p/v) lors de cette étape. La pâte est ensuite entreposée dans des réservoirs jusqu'à ce qu'elle soit utilisée à la papeterie. Très souvent les usines ont leurs propres machines à papier qu'elles alimentent directement de leur propre pâte sinon la pâte est vendue à des papeteries. Le rendement de la transformation du bois en pâte par le procédé thermomécanique se situe entre 91 et 95%, ce qui est légèrement plus bas que celui du procédé mécanique classique à la meule (94 - 96%).

Figure 1 : Procédé thermomécanique classique (McCubbin, 1984)



En dépit du fait que le rendement du procédé PTM est légèrement inférieur à celui de la pâte mécanique classique il donne une pâte dont la résistance est nettement supérieure (McCubbin, 1984).

1.3 Les usines et l'environnement

La fabrication des pâtes et papiers s'est développée au Canada au cours de la première moitié de notre siècle - une époque où les questions d'environnement rencontraient l'indifférence générale. Depuis lors, les besoins d'une société plus exigeante et plus complexe ont exigé que l'on porte une plus grande attention à l'environnement. Ces attitudes sont partagées par les gouvernements, l'industrie et la population dans son ensemble.

Dans l'industrie des pâtes et papiers, ce souci a occasionné de vastes dépenses visant à réduire la quantité de matières libérées dans les rivières et dans l'atmosphère. S'il faut construire une nouvelle usine, 10 à 15% de l'investissement total en capital sera attribué, en général, aux systèmes de lutte contre la pollution, ce qui peut atteindre 35 millions de dollars ou plus (ACPP, 1987). Les mêmes normes de qualité de l'environnement s'appliquent à la première génération d'usine.

Le gouvernement fédéral, les gouvernements provinciaux et les municipalités exercent une certaine juridiction sur divers aspects de la protection de l'environnement, en rapport avec l'industrie des pâtes et papiers. Les municipalités n'ont pas beaucoup intervenu dans la réglementation des rejets d'usines, mais toutes les provinces où est installée l'industrie des

pâtes et papiers ont mis sur pied des organismes de protection environnementale et ont adopté des mesures législatives pour contrer la pollution qu'engendre cette industrie.

1.3.1 Rejet d'effluents

La commission d'enquête sur les déchets dangereux, qui a remis son rapport au Ministère de l'Environnement du Québec en 1990, a informé que les exigences réglementaires (Règlement fédéral sur les fabriques de pâtes et papiers et le programme de réduction des rejets industriels) auront pour effet que des contaminants qui sont actuellement rejetés dans les cours d'eau par les effluents, devront être retenus par un système de dépollution adéquat. La recommandation 92 de cette commission d'enquête sur les déchets dangereux est à l'effet que "le règlement sur les fabriques de pâtes et papiers soit modifié de façon à introduire un régime de gestion sûr et contrôlé des déchets et de leur dépôt définitif". De plus la politique du gouvernement du Québec concernant la gestion intégrée des déchets vise à réduire de 50% d'ici l'an 2000, le volume des déchets à acheminer aux lieux d'enfouissement (Lefebvre, 1993). Le règlement provincial sur les fabriques de pâtes et papiers (Q-2, a-31) et le règlement fédéral sur les effluents des fabriques de pâtes et papiers (Anonyme 4, 1992) touchant principalement les matières en suspension, la DBO, la toxicité, le pH, les composés organiques halogénés absorbables (COHA) et certains autres contaminants potentiels. Les principales dispositions de ces règlements sont entrées en vigueur vers la fin de l'année 1995 (Anonyme 2, 1995).

1.3.2 Traitement des effluents

Selon l'ACPP (1987), "Dès que le bois arrive à l'usine, sous forme de copeaux ou de billes, chaque étape de fabrication - trituration, blanchiment, fabrication du papier, couchage - exige de très grandes quantités d'eau. Au moment où les eaux usées quittent l'usine, elles transportent des solides et des matières organiques qui exigent un traitement avant d'être libérées dans les cours d'eau." Les caractéristiques de ces eaux usées dépendent du procédé de fabrication de la pâte du papier. Les eaux usées des usines de pâtes et papier qui nécessitent un traitement, subissent d'abord un prétraitement. Par la suite elles sont traitées en deux étapes principales : les traitements primaires et secondaires. Un graphique type du déroulement des systèmes de traitement primaires et secondaires est présenté à la figure 2.

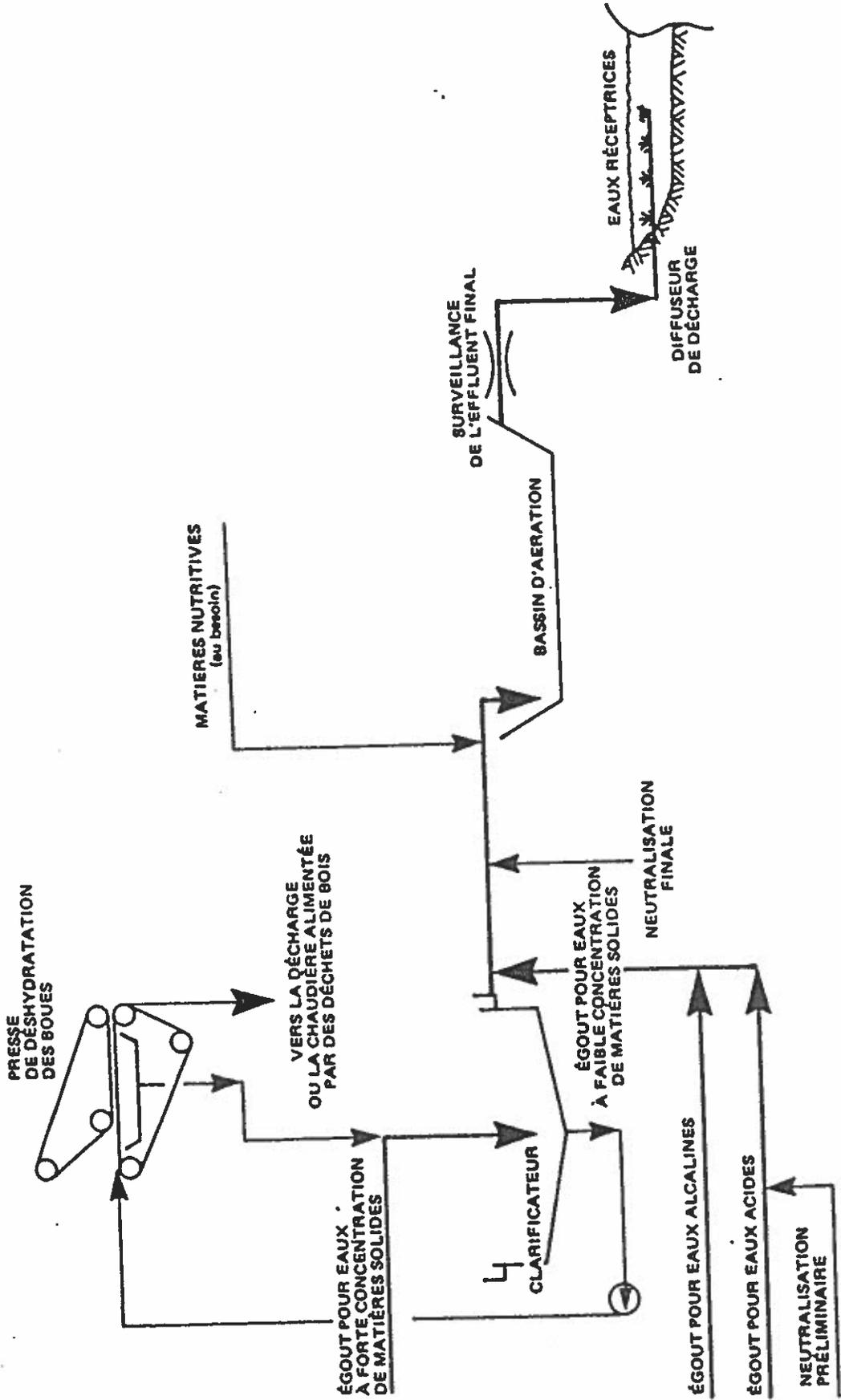
1.3.2.1 Prétraitement

Le prétraitement sert à éliminer le sable et les gros débris et à neutraliser le pH de l'effluent. Pour ce faire on utilise des déssableurs, des grilles à barreaux, et selon le cas des produits chimiques alcalins ou acides.

1.3.2.2 Traitement primaire

Les procédés de traitements primaires sont conçus pour éliminer les matières solides en suspension dans l'effluent. Ils comprennent la déshydratation des matières solides décantées

Figure 2 : Système typique de traitement de l'effluent (McCubbin, 1984)



et récupérées sous forme de boues. Le mélange pâteux issu de ce traitement est appelé boues primaires. Le traitement primaire est effectué dans des clarificateurs par gravité ou dans des décanteurs et dans certains cas, dans des appareils de flottation sous pression. Ce traitement élimine 80 à 95% de la partie décantable des matières solides en suspension. Le reste des matières solides en suspension ou de la partie non décantable, comprenant des matières colloïdales ou très fines, passe dans le système et, s'il s'agit d'une fraction importante de la masse totale, peut nécessiter l'addition de produits chimiques pour activer la décantation. Les adjuvants de décantation ou de floculation sont l'alun, le chlorure ferrique et les polyélectrolytes (McCubbin, 1984).

1.3.2.3 Traitement secondaire

Le traitement secondaire se fait après le traitement primaire et s'effectue sur la partie la plus liquide issue du traitement primaire. Ce deuxième traitement sert principalement à réduire la quantité de matière organique dissoute dans le liquide rejeté du traitement primaire. Il vise à éliminer la DBO de 70 à 95%, provoquée par les matières organiques dissoutes dans l'effluent. Le traitement secondaire est aussi appelé traitement biologique, car il compte sur les microorganismes naturels pour convertir les matières organiques dissoutes en matières inoffensives pour le milieu. Les microorganismes sont un mélange de bactéries, d'algues, de champignons, de protozoaires et d'autres formes de vie supérieure, qui se transforment continuellement pour s'adapter aux caractéristiques et aux conditions de l'effluent dans la

cuve de réaction (McCubbin, 1984). Le pH dans la cuve de réaction biologique doit être presque neutre et la température maximale acceptable est d'environ 35° C. Les principales matières nutritives nécessaires sont le carbone, l'oxygène, l'azote et le phosphore. Il y a toujours suffisamment de carbone, puisque l'objectif du système de traitement vise normalement à éliminer les éléments de carbone organique de l'effluent. L'oxygène doit être fourni par des moyens mécaniques, la plupart du temps par des aérateurs de surface. Les effluents de pâtes et papiers manquent en général d'azote et de phosphore. Ces matières sont donc ajoutées pour maintenir l'efficacité du système de traitement.

1.4 Gestion des boues

Le tableau 3 présente les quantités de boues papetières produites par les usines québécoises en 1990 et les prévisions pour 1995. À noter qu'au moment de la rédaction de ce mémoire, aucune donnée n'est disponible pour l'année en cours.

Tableau 3 : Quantité de boues produites par les usines québécoises par catégorie de traitement d'effluent.

Type de boue	Quantité (t.m.s / j)	
	1990	1995
Primaire	1 226.5	1 226.5
Secondaire	4.6	263
Désencrage	95	420

(Simons, 1992)

Les quantités de boues générées par les industries papetières sont si importantes que certaines régions soient même aux prises avec des problèmes d'accumulation (Sauvesty et Tabi, 1995).

Bien qu'au Québec de grands volumes de boues soient enfouis ou incinérés, il existe d'autres méthodes de gestion moins connues qui méritent d'être considérées. Parmi ces méthodes, le compostage qui actuellement utilise seulement 4% des boues primaires produites (Simons, 1992).

Ailleurs au monde le compostage est actuellement un des modes de gestion adoptée par l'industrie papetière. Ainsi aux États Unis, Blosser du NCASI Inc., a publié en 1984 un bulletin technique dans lequel il est mentionné que le compostage des boues papetières primaires et secondaires se fait de façon régulière dans l'état de la Pennsylvanie. Le compost obtenu peut être mis sur le marché. Les principaux acheteurs étant les agences gouvernementales, les fermiers, les serriculteurs, les aménagistes paysagers et les pépiniéristes.

2. Compostage

2.1 Objectifs du compostage

L'épandage des matériaux à l'état frais (non décomposés) est limité pour les raisons énumérées au tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques limitant l'emploi de matériaux à l'état frais.

Matière organique fraîche	Effets négatifs
Rapport C/N trop élevé	Immobilisation d'azote Hypoxie (manque d'oxygène)
Présence de pathogènes Fortes teneurs en ammoniacque Substances phytotoxiques Fortes odeurs	Danger pour la santé Mort des plants Mort des plants Commercialisation difficile

(Potvin et Cloutier, 1989)

Le compost constitue un amendement stable et sécuritaire. Il permet donc d'appliquer au sol des matières organiques stabilisées sans effets négatifs sur les plantes. Les objectifs poursuivis par le compostage sont multiples et fort différents. Le tableau 5 résume les effets obtenus lors du compostage.

Tableau 5 : Différents effets attribués au compostage.

PROCÉDÉ DE COMPOSTAGE				
	Effet A	Effet B	Effets C	Effets D
	Utilisation de matières organiques	Transformation des matières organiques	Élévation des températures	Production de compost
O B J E C T I F S	1-Protection de l'environnement 2-Économie pour la disposition	1-Baisse du rapport C/N 2-Disparition des odeurs (substances volatiles) 3-Transformation des substances phytotoxiques 4-Nitrification 5-Réduction des volumes 6-Perte en poids de matière organique	1-Diminution des pathogènes 2-Diminution de l'eau par évaporation	1-Amendement organique de qualité variable

(Potvin et Cloutier, 1989)

Définition du terme compostage

Diverses définitions sont données au terme compostage. Pour fins d'exemples on peut citer Toth et Gold, (1971) qui définissent le compostage comme : "Un processus visant à convertir les déchets organiques en complexes lipoprotéiques ou humus par l'intermédiaire d'organismes thermophiles sous des conditions optimum d'humidité et d'aération". Pour Pos (1973), le compostage est : "Un processus de décomposition biologique aérobie qui convertit la matière organique solide biodégradable en humus stable".

Le processus de compostage se divise en deux étapes, soit la décomposition et la maturation. La décomposition est caractérisée par une active modification des structures existantes de la matière. La maturation, quant à elle, est dominée par des réactions d'humification et est caractérisée par un ralentissement de l'activité des microorganismes causé par la présence d'un substrat plus stable.

Dans le but de restreindre le terme compostage à un processus bien défini, Zucconi et al. (1987) proposent la définition suivante : "Le compostage est un processus de bio-oxydation contrôlé qui met en cause un substrat organique hétérogène à l'état solide ; évolue vers une phase thermophile, mène à la production de dioxyde de carbone, d'eau, de minéraux et de matière organique stabilisée (compost)".

Définition du terme compost

Selon Zucconi et al., (1987), le compost est : "produit stabilisé , hygiénisé issu du compostage qui est bénéfique à la croissance des plantes. Il a subi une première phase rapide de décomposition et est en cours d'humification".

Historique du compostage

Selon Gotaas (1959), les premiers progrès importants dans la pratique du compostage furent accomplis par Sir Albert Howard vers les années 1930 en Inde où, en collaboration avec Jackson et Wade, il systématisa les méthodes traditionnelles et mit au point une

technique connue sous le nom de « Procédé Indore » d'après la localité dans laquelle elle fût élaborée. Le procédé initial consistait à alterner des couches de matériaux facilement décomposable (tels que fumiers, boues d'égout et ordures ménagères), avec des couches de matières organiques relativement stables (paille, feuilles, etc...). Le tout est empilé en tas de 1,5 m de haut et disposé dans des fosses de 0,60 à 0,90 m de profondeur. Le procédé prévoit deux retournements durant la période de compostage dont la durée est d'au moins six mois.

Au cours des années, le procédé a été profondément modifier par plusieurs chercheurs cités par Gotaas, (1959) dont Sharff en Malaisie et Wilson en Afrique Orientale qui ont fait des études considérables sur les variations de la méthode d'Indore et sur l'utilisation du compost comme engrais.

Parmi les innovations les plus importantes, il convient de signaler l'apport d'oxygène par le retournement plus fréquent qui, entretenant des conditions favorables aux microorganismes aérobies assurent une décomposition plus rapide et permet ainsi d'abrèger la période de compostage.

En 1935, Scott cité par Gotaas, (1959) entreprit des études sur le compostage à l'occasion de travaux sur l'assainissement agricole exécutés en Chine du Nord. Il a étudié des aspects tels que l'effet de destruction des germes pathogènes qui permettent d'obtenir différentes techniques de compostage, la récupération d'azote dans les diverses méthodes de compostage et de conservation du compost, l'action du compost sur le rendement des

récoltes, et les effets de la variation des proportions des diverses catégories de déchets sur la qualité du compost.

Selon Gotaas (1959), de 1936 à 1941, Waksman et ses collaborateurs ont fait des recherches fondamentales sur la décomposition aérobie des résidus végétaux et du fumier d'étable. Ils ont publié des données importantes concernant l'influence de la température sur la vitesse de décomposition. Selon eux, le maintien des températures élevées (40-60°C.) sur une période prolongée (7 à 10 jours) augmente la vitesse de dégradation dans le compostage.

En 1959, Gotaas a fait des recherches sur certains aspects du compostage des déchets urbains avec ou sans addition de boues d'égoût. Leurs travaux ont permis d'obtenir des précisions essentielles sur l'effet respectif des divers facteurs qui interviennent dans le compostage aérobie à savoir : température, humidité, aération, rapport C/N et sur les types d'organismes qui se développent au cours du compostage.

2.2. Processus de compostage

Lors du compostage, la décomposition des matières organiques s'effectue comme dans les sols, suivant des chaînes de transformations naturelles. La décomposition aérobie de la matière organique donne naissance en général à du gaz carbonique, de l'eau, de l'ammoniaque et de l'azote libre. Les minéraux qui sont en quelques sortes enfermés dans la matière organique et inassimilables dans cet état par les plantes, deviennent libres et passent pour la plupart sous formes assimilables.

2.2.1 Transformation biochimique lors du compostage

2.2.1.1 Décomposition de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine

Selon Waksman (1952), il semble que 30 à 40% de la cellulose décomposée serait convertit en des substances qui feront partie du protoplasme des microorganismes. Les bactéries aérobies mésophiles qui décomposent la cellulose opèrent à une température optimale de 20 à 28° C. Pour les champignons thermophiles, la température se situe entre 45 et 55° C. Quant aux bactéries et actinomycètes thermophiles, leur température optimale est de 50 à 65° C.

Waksman, (1952) analysant les travaux de Jensen conclut que la plupart des organismes qui sont responsables de la décomposition de la cellulose opèrent bien à un pH variant de 7,1 à 7,6. De plus la quantité d'azote requise pour bien décomposer la cellulose est d'environ une partie d'azote pour 25 à 54 parties de cellulose. Enfin les bactéries qui décomposent la cellulose ne produisent pas de substances humiques, alors que les champignons en produisent. Selon Alexander, (1977) le métabolisme des hémicelluloses est gouverné par les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux, le pH et la température du milieu. De la même façon que pour la cellulose, la décomposition des hémicelluloses est facilitée par la présence de l'oxygène et d'azote minérale.

Pour la lignine, une de ses caractéristiques c'est d'être très résistante à la décomposition microbienne et par conséquent, celle-ci est lente (Allison, 1973). Plusieurs auteurs concluent que la lignine est une source importante, sinon la plus importante source de matière première

pour la formation des acides humiques. Une augmentation marquée de la quantité d'acides humiques accompagne souvent la dégradation de la lignine (Pochon et De Barjac, 1958; Dommergues et Mangenot, 1970 ; Flaig, 1972).

2.2.1.2 Décomposition des matières azotées

Au cours du compostage il n'y a pas que les hydrates de carbone qui sont oxydés. Les matières azotées contenues dans les débris d'origine végétale et animale le sont aussi en subissant des transformations dont le résultat est la formation d'ammoniac.

Selon Fortin et al., (1982), l'oxygène attaque la matière azotée en transformant son carbone en gaz carbonique, son soufre en acide sulfurique et son hydrogène en eau. L'ammoniac demeurant en quelque sorte comme résidu, et c'est le premier produit de la décomposition.

2.2.2 Principales étapes du compostage

Le compostage est un processus de dégradation qui s'effectue en trois phases : une phase caractérisée par la montée rapide de la température, une phase de dégradation accélérée dite chaude et enfin une phase de dégradation lente dite froide.

2.2.2.1 Phase de montée rapide de la température

Cette phase est caractérisée par une production intense et subite de chaleur pouvant atteindre facilement 65° C (Finstein et Morris, 1975) et parfois plus, soit 70° C en trois ou quatre jours (Choinière et Gangbazo, 1982).

2.2.2.2 Phase de dégradation accélérée

Il s'agit d'une phase où la température se maintient dans une zone dite thermophile soit supérieure à 40° C. Durant cette période de transformation active, il se produit une forte décomposition de la matière organique. Plus les conditions optimales sont respectées (élément nutritif, humidité 40-70%, température 40-60°C., aération 5-15% d'O₂, pH 5,5-8, rapport C/N 25-40, etc...), plus cette phase se prolonge et meilleur est le compost final.

Selon Keller (1961), cette phase de dégradation chaude est caractérisée par une teneur en gaz carbonique élevée (20 à 35%), et une teneur en oxygène faible (0 à 1%), ceci pour un tas de compost bien aéré.

2.2.2.3 Phase de dégradation lente

Au cours de cette phase, il se produit très peu de dégagement de chaleur, la température du tas de compost diminue graduellement pour atteindre des conditions mésophiles (inférieures à 40° C). Durant cette période, il se produit des transformations importantes soit la décomposition lente des lignines, ainsi que des synthèses conduisant à l'humus.

Selon Keller, (1961) la teneur en gaz carbonique du tas de compost diminue considérablement et le contenu en oxygène augmente progressivement. La maturation n'est atteinte que lorsque la température à l'intérieur de la masse atteint la température extérieure, qu'elle n'augmente plus à la suite d'aérations subséquentes et que la composition des gaz à l'intérieur du tas est semblable à celle de l'air extérieur.

2.2.3 Changements de poids et de volume au cours du compostage

2.2.3.1 Pertes de poids au cours du compostage

Le compostage favorise des pertes importantes de poids dépendant du matériel utilisé. Willson (1971) mentionne dans une étude sur le compostage du fumier de vache, des pertes allant de 47 à 80%. Il conclue qu'une partie de cette perte est due à la déshydratation qui se produit au cours du compostage ; l'autre partie est due à la dégradation des solides volatiles.

Demmel, (1979) pour sa part, fait état des pertes de poids variant de 75 à 80% dans le compostage à base de fumiers, tandis que Toth et Gold, (1971) citent les chiffres de 40 à 60% pour la réduction de poids dépendant des matériaux de bases.

Campbell et al., (1991) citent les études antérieures réalisées sur le compostage des boues papetières. Ils mentionnent que de nombreux auteurs ont démontré que le compostage réduit le poids des boues. Wysong, (1976) atteste que le poids peut être réduit de 32 à 46%.

2.2.3.2 Réduction des volumes au cours du compostage

Le compostage occasionne aussi des réductions de volume dont l'importance dépend du type des matériaux à composter. Besley et Cook, (1971) ont obtenu des réductions de volume de 23 à 43% pour des composts faits à base d'ordures ménagères de paille et de lisier de porcs. Wysong, (1976) pour sa part a rapporté des réductions allant de 34 à 52% lors du compostage de boues papetières combinées (primaires - secondaires) de type Kraft.

3. Contrôle des principaux paramètres du procédé de compostage

3.1 L'aération lors du compostage

Plusieurs auteurs avancent que la teneur en oxygène à l'intérieur d'une masse à composter doit être de 5 à 15% (Faust et Romano, 1978 ; Mustin, 1987 ; Campbell et al., 1991). Selon Wilson, (1971) le compost peut être aéré selon les besoins en oxygène des microorganismes, lorsque la teneur en oxygène à l'intérieur de la masse de compost baisse à 2%, et également selon l'évolution de la courbe de température du compost. En effet une baisse prolongée de la température du compost au cours de la période de dégradation accélérée (phase chaude), est le signe d'un manque d'oxygène à l'intérieur de la masse.

Un manque d'oxygène résultera en une baisse de l'activité microbienne par asphyxie (Lacroix, 1979). L'aération se fait souvent par brassage. Dans ce cas, en plus de fournir de l'oxygène dont les microorganismes ont besoin, celle-ci à l'avantage de redistribuer : la population microbienne, l'humidité à travers la masse à composter et enfin d'évaporer le

surplus d'humidité s'il y a lieu. L'air peut être aussi fourni par un système d'aération forcée nécessitant des installations particulières mais permettant un bon contrôle.

3.2 La teneur en eau du substrat

Dans le processus de compostage, l'eau a plusieurs rôles à jouer. Elle sert de véhicule de transport et aide à la disposition des microorganismes, active les réactions chimiques en permettant la diffusion vers les molécules organiques des enzymes digestives sécrétées par les microorganismes et enfin absorbe et maintient la chaleur générée par le processus.

Selon Gray, (1992) il est nécessaire que le taux d'humidité ne soit pas en dessous de 50%, étant donné que l'activité des microorganismes étant intimement liée à la quantité d'eau disponible dans le substrat.

Dans une étude sur le compostage des boues papetières, Campbell et al., (1991) suggère un taux d'humidité compris entre 40% et 70%.

3.3 La température du compostage

Tous les auteurs semblent unanimes pour dire que les températures maximales pouvant être atteintes lors de la phase thermophile ne correspondent pas à l'optimum. En effet, ces températures trop élevées (75° C et plus) sont préjudiciables pour plusieurs sinon pour la plupart des microorganismes actifs dans la décomposition. Ainsi Mote et Griffis, (1978) ont observé dans le compostage de déchets de culture de coton que la région de température

maximale du tas ne coïncidait pas avec la région de décomposition maximale. En fait, à ces hautes températures, seules certaines bactéries thermophiles qui sporulent peuvent prendre une part active à la décomposition. (Finstein et Morris, 1975 ; Bagstam, 1979). Certains auteurs suggèrent comme optimum des températures se situant entre 40° et 47° C (Cappaert et al., 1976), d'autres privilégient des températures de 50° à 55° C (Golueke, 1976 ; Finstein et Morris, 1980). Selon Mustin, (1987) l'optimum semble se situer aux alentours de 65° C. Quant à Campbell et al., (1991), l'optimum se situe à 60° C. Pour la décomposition de la cellulose, l'optimum se situe à 50°C. (Mote et Griffis, 1978).

3.4 Le pH du substrat

Le pH initial du matériel à composter dépend évidemment de la nature de celui-ci. C'est un paramètre important à considérer du fait que les microorganismes qui effectuent la décomposition ne peuvent le faire que dans certaines limites d'acidité et d'alcalinité, c'est à dire à des pH entre 5,5 et 8.

3.5 Le rapport C/N

Le processus de décomposition des matières organiques est influencé par la présence de carbone et d'azote. Le rapport C/N exprime les proportions respectives de ces deux éléments. Cette décomposition est provoquée par des microorganismes qui utilisent le carbone comme source d'énergie et l'azote comme élément constitutif de la substance

cellulaire. Le processus exige plus de carbone que d'azote, mais lorsque l'excédent de carbone est trop considérable (rapport C/N trop élevé), la décomposition est ralentie à partir du moment où les réserves d'azote sont consommées et certains microorganismes meurent. L'azote libéré par la lyse des cellules bactériennes est alors utilisé par d'autres microorganismes pour constituer leur substance cellulaire et de nouvelles quantités de carbone sont brûlées dans cette opération. De la sorte la quantité de carbone est ramenée à un niveau plus satisfaisant tandis que l'azote est réintroduit dans le cycle. Ce phénomène retarde le compostage. À l'opposé lorsque la source d'énergie, c'est à dire le carbone est inférieur à la quantité requise pour convertir tout l'azote disponible en protéines (rapport C/N trop bas), les microorganismes consomment le carbone disponible et éliminent l'excès d'azote sous forme d'ammoniac. Il en résulte une perte d'azote dans le tas de compost. (Gotaas, 1959).

Tous les auteurs ne s'entendent pas sur le rapport C/N précis qui serait optimum. Cependant les rapports suggérés sont habituellement dans le même ordre de grandeur. Ainsi Bell et al., (1973), Cochrane, (1980), suggèrent un rapport entre 30 et 35. Golueke, (1972) de son côté dit que le rapport C/N optimum pour la plupart des débris se situe entre 20 et 25. Plus récemment Campbell et al., (1991), proposent des rapports compris entre 20 et 40.

Au cours du compostage, le rapport C/N diminue (Golueke, 1972) de sorte que le compost final a un rapport C/N de 10 à 12 (Cochrane, 1980). La baisse de ce rapport est due à une perte de carbone en CO_2 .

4. Microbiologie générale du compostage

4.1 Les microorganismes du compostage

Le compostage aérobie est un processus dynamique qui résulte de l'action combinée et prolongée de bactéries, d'actinomycètes et de champignons. Chaque flore est adaptée à un milieu particulier pour une durée relativement limitée et participe sélectivement à la décomposition de telle ou telle catégorie de composés, chacune complète l'activité des autres.

L'essentiel de la microbiologie du compostage a été connu dès 1938 à la suite des travaux de Waksman et Gordon, (1939), qui ont montré dans d'importantes études sur la microbiologie du compostage aérobie du fumier et d'autres matières organiques, que certains microorganismes ont certaines fonctions spécifiques et qu'aucun d'entre eux, si actif soit-il ne réussit aussi bien qu'un mélange de souches à produire une décomposition rapide et satisfaisante.

Au début du processus de compostage, les bactéries mésophiles prédominent de manière caractéristique, puis cèdent rapidement la place aux bactéries et actinomycètes thermophiles qui envahissent toutes les parties de la masse où la température est satisfaisante. Les champignons thermophiles apparaissent généralement au bout de 5 à 10 jours et les actinomycètes mésophiles prennent de l'importance au cours des dernières phases.

Les bactéries sont des intervenants majeurs dans la transformation de la matière organique. Elles agissent à bien des niveaux et processus biochimiques. Il est pratiquement impossible

d'aborder ici toutes leurs actions. Nous nous limitons à souligner leurs principales activités ainsi que les représentantes les plus actives dans la dégradation. Les *Bacillus sp* sont responsables de la dégradation des glucides simples. Parmi les bactéries dégradant la cellulose, on rencontre les *Cellvibrio*, *Cellfacicula sp*, les *Pseudomonas* et *Cellulomonas*, les *Achromobacter sp*. Parmi celles-ci, certaines peuvent dégrader l'hémicellulose.

En ce qui concerne les actinomycètes, leur principale caractéristique est de pouvoir attaquer les substances résistantes à la décomposition bactérienne. Ils sont responsables de la dégradation de la lignine et interviennent surtout dans les premières étapes du processus d'humification (Allison, 1973). Beaucoup d'odeurs aromatiques des sols ou composts mûrs sont dûes aux actinomycètes (Mustin, 1987). Parmi les actinomycètes, les genres *Streptomyces* et *Micromonospora* sont les plus courants dans les composts (Waksman et al., 1939 b).

Les champignons sont également responsables de la dégradation de la cellulose et de la lignine et participent aussi à la formation d'humus. Les plus souvent rencontrés dans les composts comprennent *Thermomyces sp.*, *Penicillium dupontii* et *Aspergillus fumigatus* (Waksman et al., 1939 a).

4.2 L'ensemencement

Les perfectionnements du compostage se sont accompagnés de nombreuses discussions sur l'importance d'inoculum spéciaux censés contenir plusieurs souches pures d'organismes

cultivés en laboratoires. Étant donné que le compostage est le résultat de la décomposition des substrats par les microorganismes, nous pensons que l'ajout de souches adaptées au substrat à dégrader, augmenterait la vitesse de dégradation. Toutefois ce sujet fait encore l'objet de controverses, et les opinions varient : certains auteurs considèrent que l'inoculation n'accélère pas le processus de décomposition tandis que d'autres constatent que l'inoculation peut avoir un effet bénéfique sur la dégradation lorsqu'appliquée à un substrat homogène et naturellement pauvre en microorganismes.

À ce sujet, plusieurs recherches ont été menées. Golueke, (1954) étudia les effets de plusieurs inoculum (fumier, sol de jardin, diverses cultures pures de bactéries) sur le compostage d'ordures, mais les microorganismes ajoutés sous forme d'inoculum ne se sont pas avérés plus efficaces que la microflore indigène de ces mêmes ordures.

Récemment, Faure et Deschamps, (1991) n'ont observé aucun effet à l'application d'un inoculum riche en microorganismes cellulolytiques et lignolytiques lors du compostage de marc de raisin. À l'opposé, plusieurs recherches concluent à l'optimisation possible par l'inoculation. Très récemment, un groupe de chercheurs du Japon (Tanaka et al., 1995) s'est intéressé aux effets procurés par l'ajout d'actinomycètes sur la dégradation de rejets de distillerie utilisant le «shochu» (céréale cultivée au Japon). Par l'inoculation de cette matière organique, ils ont réussi en seulement 15 jours à produire du compost.

En général, les réussites d'inoculation sont reportées pour des substrats homogènes et lignocellulosiques (Gaur, 1979. Gaur et al., 1982. Matthur et al., 1986. Yadav et al., 1982. Nakasaki et al., 1994).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Description du substrat

1.1 Provenance

Les mélanges des boues papetières primaires et secondaires ayant servi aux essais de compostage sont gracieusement fournies par la compagnie de produits forestiers DONOHUE NORMICK Inc., (Amos, Québec) qui a déterminée la proportion ainsi que la siccité de chaque lot. Les boues sont issues de la production d'une pâte par le procédé thermomécanique (PTM).

1.2 Caractérisation et aspect physique

Les boues papetières étaient constituées d'un mélange de boues primaires et secondaires. Vu la forte proportion d'eau contenu dans les boues secondaires, leur contenu élevé en azote (3,44%) (Seekins, 1986) ainsi que leur aspect gélatineux, celle-ci nécessitent l'apport d'un co-substrat carboné, qui d'une part augmentera le rapport C/N, initialement trop bas, et d'autre part homogénéisera les boues afin d'obtenir un matériau de départ présentant une granulométrie adéquate pour la pratique du compostage.

1.3 Proportion

La proportion du mélange des boues de pâtes et papiers qui a servi aux quatre essais de compostage était différente selon les lots; le tableau n° 6 résume les caractéristiques de chaque lot de boues papetières.

Tableau 6 : Proportion de boues papetières primaires et secondaires contenues dans les différents lots ayant servi au compostage.

Composition du mélange	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 4
Boues primaires	80%	65%	50%	50%
Boues secondaires	20%	35%	50%	50%
Siccité	35%	30%	35%	35%

Le lot n°1 nous a servi à isoler des microorganismes à partir des boues papetières lors des différentes phases du compostage. Il nous a également permis de sélectionner des méthodes citées plus loin pour suivre la décomposition de la matière organique et de mettre au point notre technique de compostage des boues papetières.

2. Conditions d'utilisation lors de l'expérimentation

Les essais de compostage se sont déroulés à petite échelle en laboratoire dans des composteurs domestiques de type *Enviro-Cycle*, dont la description sera donnée plus bas. La température moyenne de la pièce était de 20° C tout au long de l'expérience. Les différents mélanges de boues primaires et secondaires étaient compostés sur une période de quarante deux jours.

2.1 Description du composteur

Le composteur de type *Enviro-Cycle* a été conçu par *Vision Récupération*. Il s'agit d'un contenant entièrement fabriqué à partir de plastique recyclé, composé d'une unité à

composter d'une capacité de 200 litres et d'une base agissant comme réservoir afin de recueillir le lixiviat (Panet, 1991) . L'unité principale rotative manuellement a été conçu dans le but de faciliter l'aération de la matière. Sa rotation est rendue possible grâce à deux séries de roulettes situées sur le dessus de la base (figure 4). De chaque côté se situent des fentes d'aération et des trous d'égouttements situés en dessous de l'unité permettent une élimination régulière du lixiviat.

Le système semble efficace pour la pratique du compostage, toutefois le plastique n'est pas un bon isolant. Pour remédier à cela, ce type de composteur a été modifié par l'ajout d'un isolant compris entre deux pellicules d'aluminium, en occurrence l'Astrofoil (facteur de rétention R égale 5) qui enveloppe l'unité principale à composter sans pour cela bloquer les fentes d'aération (figure 5).

Selon Mustin, (1987) "toute isolation externe d'une masse qui n'agit pas sur la circulation de l'oxygène aura pour effet une augmentation de la température interne avec stabilisation à une température d'équilibre pour laquelle la production de chaleur compense la déperdition de chaleur".

Figure 3 : Composteur domestique Enviro-Cycle

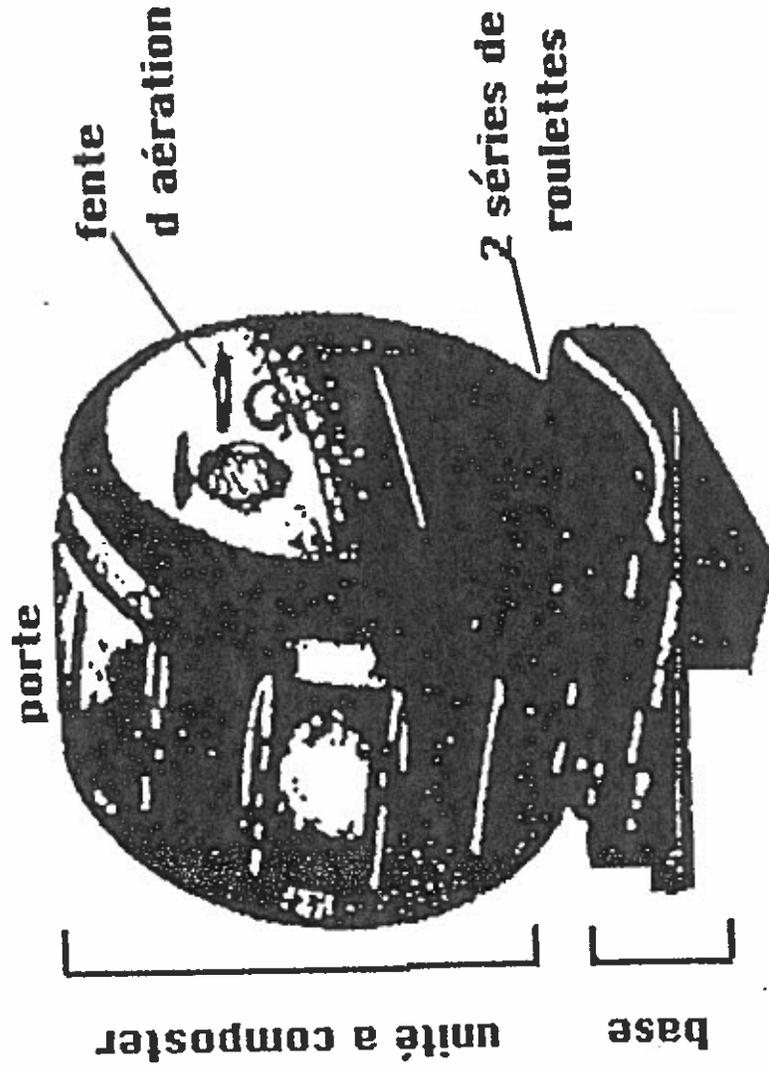
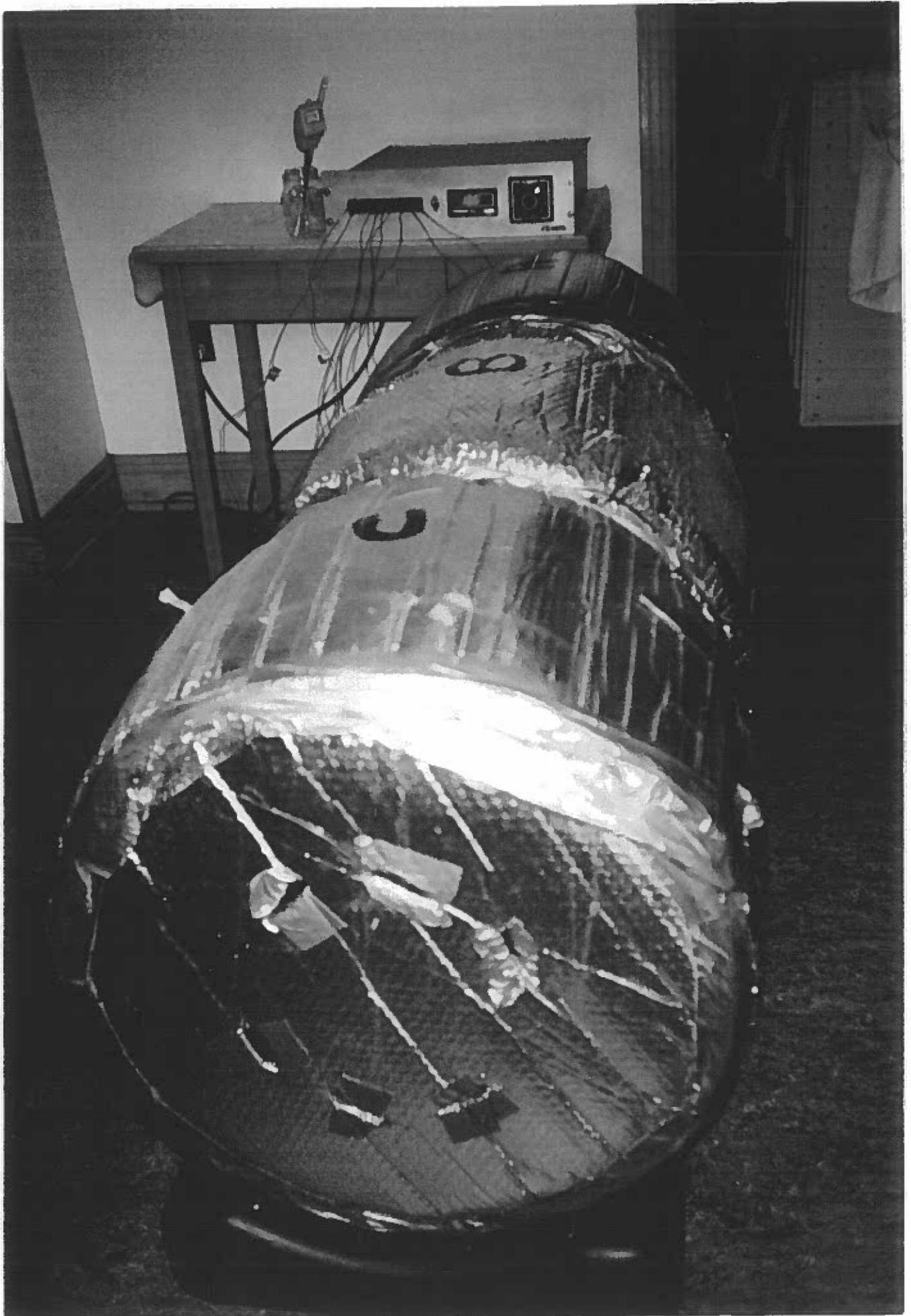


Figure 4 : Composteurs isolés avec l'Astrofoil



2.2 Essai de compostage

Chaque essai de compostage comprend trois composteurs isolés identifiés par les lettres A, B et C. Le composteur A a été inoculé au début du processus. Quant au composteur B, l'inoculation s'est effectuée dès la fin de la phase thermophile soit le quatorzième jour, quand la température s'est stabilisée vers 30-35° C. Le composteur C a servi de contrôle.

2.3 Aération

Des retournements et des brassages de la matière ont été effectués régulièrement de façon à procurer de l'oxygène nécessaire aux microorganismes. L'aération a été réalisée à raison de deux fois par jour pendant les premiers jours de compostage (10-12 jours), où les besoins en oxygène sont forts. Par la suite l'aération a été réduite à raison d'une fois par jour, puis à tous les trois jours; durant ces phases les besoins en oxygène sont moyens.

3. Analyse microbiologique

3.1 Élaboration de l'inoculum

3.1.1 Origine des souches

La presque totalité des souches qui ont servi à la composition de l'inoculum ont été isolées à partir des boues papetières, à l'exception d'une souche de champignon *Pleurotus ostreatus* ATCC 58052 et d'un mélange bactérien non identifié ATCC 31205 provenant de "l'Américain Type Culture Collection" (Rockville, Maryland, USA). Ces souches ont été

spécialement choisies pour leur capacité à dégrader des substrats lignocellulosiques (Platt, 1984; Coulthard, 1989).

3.1.2 Isolement des microorganismes

Plusieurs souches d'actinomycètes et de bactéries ont été isolées à partir du compost en évolution sur milieu solide sélectif (milieu Benet's) et non sélectif PCA (DIFCO, Détroit, États Unis). Ces milieux ont été incubés à 30 et 55°C pour une période de trois et de sept jours, soit le temps nécessaire pour obtenir des actinomycètes, puisque ces derniers accusent une croissance lente.

3.1.3 Sélection de souches

Le but de l'élaboration d'un consortium microbien était d'obtenir un mélange composé de différents organismes performants pouvant réaliser la biodégradation rapide du substrat. Pour cela des souches d'actinomycètes et de bactéries ont été sélectionnées. Le choix s'est arrêté sur deux bactéries Gram- retrouvées uniquement lors de la phase active de décomposition, soit la première phase mésophile du compostage. Deux autres bactéries Gram+ retrouvées dans la phase finale du compostage ont été sélectionnées.

3.1.4 Préparation des cultures

La souche *Pleurotus ostreatus* ATCC 58052 a été reçue au laboratoire sur gélose inclinée, et le mélange bactérien non identifié ATCC 31205 à l'état lyophilisé. À leur arrivée ils ont été suspendus dans un milieu de croissance, et incubés à des températures recommandées par l'ATCC (Tableau 7).

Les souches isolées à partir des boues papetières ont été purifiées par repiquage sur milieu solide. Les colonies isolées étaient transférées dans du bouillon nutritif stérile (250 ml) et incubées à 30° C durant 24h dans un agitateur rotatif (G24 Environmental Incubator Shaker, New Brunswick. Scientific Co.Inc., N.J. États-Unis) à 200 rpm. Des colorations Gram (DIFCO Becton Dickinson Microbiology Systems, États-Unis) ont été effectuées afin de vérifier la pureté des souches. L'utilisation du microscope a permis de préciser les paramètres morphologiques de chaque souche isolée.

L'activité cellulolytique des actinomycètes isolés a été testée sur deux colorants, le bleu de méthylène et le rouge congo (Fisher Scientific Company, N.J. États-Unis) ajoutés, au milieu de culture dans les proportions de 0,0005% et 0,002%.

Après cinq jours d'incubation à 30° C, l'apparition de zones plus claires autour des colonies indiquent la présence d'enzymes (Hapwood et al., 1985 ; Pasti et al., 1991 ; Chahal et al., 1995).

Tableau 7 : Milieux de culture et température utilisés en fonction des souches.

Souches #	Microorganismes	T.(°C)	Milieu liquide	Temps (jrs)
1	actinomycète	55	B.N ¹	1
2	bactérie	30	B.N ¹	1
3	bactérie	30	B.N ¹	1
4	actinomycète	55	B.N ¹	1
5	bactérie	55	B.N ¹	1
6	bactérie	55	B.N ¹	1
7	actinomycète	55	B.N ¹	1
8	mélange bactérien	55	1 386 ²	1
9	champignon	30	200 ²	10

1=Bouillon nutritif

2=Milieux recommandés par l'ATCC

3.1.4.1 Conservation

Les diverses souches microbiennes ont été cultivées en milieu liquide dans le but d'avoir des cultures jeunes de 24h en condition optimale de croissance. Le tableau 7, résume les conditions de croissance pour chacune des souches utilisées.

Les souches ont été incubées dans un agitateur rotatif (G24 Environmental incubator Shaker, New Brunswick. Scientific Co.Inc., N.J. États-Unis) à 200 rpm. Après incubation, les cultures étaient centrifugées et les culots suspendus dans une solution stérile de glycérol à 20% afin de protéger les cultures cellulaires contre les effets nocifs de la congélation. Les cultures sont par la suite transférées et réparties dans des tubes de plastiques stériles de 5 ml.

Pour chacune des neuf (9) souches, 15 tubes renfermant 4 ml de culture stock ont été préparés. Subséquemment ces tubes furent entreposés dans un congélateur à -80°C et servaient d'inoculum pour les cultures-mères.

3.1.4.2 Préparation de l'inoculum

Pour la préparation de l'inoculum, 4 ml du contenu de chaque culture stock étaient transférés dans un Erlenmeyer de 2 L contenant un bouillon nutritif stérile (1 L). Ces repiquages étaient toujours effectués à l'intérieur d'une hotte à flux laminaire (BioGard Hood, The Baker Company Inc., États-Unis), désinfectée avec une solution éthylique de "Dettol" 5% et stérilisée régulièrement par des rayons UV. Une incubation de 24h à 30°C et 55°C était réalisée sur un agitateur rotatif (G24 Environmental incubator Shaker, New Brunswick Scientific Co.Inc., N.J. États-Unis) à 200 rpm. À partir de ces cultures de 24h (7 jours pour le champignon *Pleurotus ostreatus*) des dilutions décimales étaient réalisées dans une solution physiologique stérile (0,85% NaCl). Un volume de 0,1 ml des dilutions effectuées ont été étalées sur un milieu PCA et incubées à 30°C pendant deux jours pour les bactéries, et cinq jours pour les actinomycètes et le champignon. Le dénombrement des UFC/ml de cette culture mère sur milieu gélosé nous a permis à la fois de nous assurer de la pureté des souches et nous a renseigné sur la concentration en cellules.

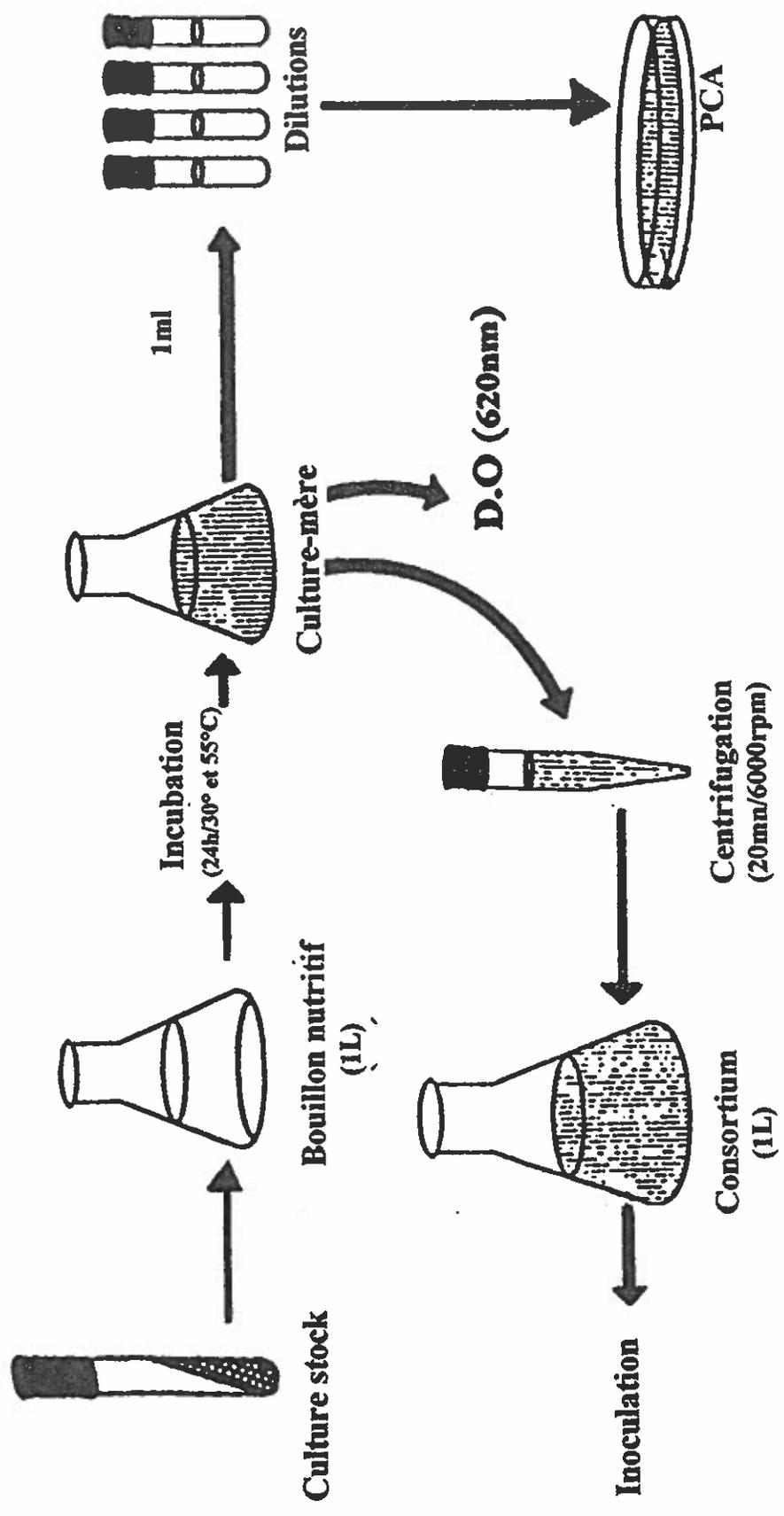
Afin de reproduire les mêmes conditions lors des différentes inoculations, une lecture de D.O à une absorbance de 600 nm était effectuée sur un spectrophotomètre (PU- 8620 UV/

VIS Spectrophotometer, Phillips Analytical, Cambridge, Angleterre). Au terme de ces deux étapes la culture-mère était centrifugée ("BECKMAN" model J21B) durant vingt minutes à 6000 rpm. Les culots de chaque culture étaient récupérés et transférés dans un Erlenmeyer de 2 L (figure 6), puis conservés à 4° C durant 24h. La préparation de l'inoculum a toujours été réalisée la veille de l'inoculation du mélange des boues . Après 24h et avant chaque inoculation, les culots conservés à 4° C étaient fragmentés puis liquéfiés pendant une minute dans un bouillon nutritif (1 L) à l'aide d'un mélangeur (Osterizer 648-38, Sunbeam Corporation Ltd, Canada). L'inoculation de la masse se fait par pulvérisation de la matière avec les cultures microbiennes liquéfiées.

3.2 Numération des microorganismes durant le compostage

À tous les sept jours et pour chaque composteur, un dénombrement des bactéries, champignons et actinomycètes est effectué. Après échantillonnage 50 g de compost étaient transférés dans un sac de plastique Stomacher stérile (Seward Medical UAC. House, Angleterre) dans lequel 450 ml de solution physiologique stérile (0,85 % NaCl) étaient rajoutés. Cette combinaison était par la suite mélangée dans un Stomacher (Lab - Blender 400, modèle BA 6021 de Seward Medical UAC House, Angleterre) durant une minute. Des dilutions décimales ont été effectuées à partir de l'homogénat. Par la suite un ensemencement par étalement d'un volume de 0,1 ml d'homogénat est effectué dans un milieu gélosé dans deux boîtes de Petri par dilution avec un étaloir stérilisé à la flamme.

Figure 5 : Préparation des différentes souches servant d'inoculum



La répartition des aliquotes d'homogénat a été effectuée dans des milieux de culture appropriés pour chaque groupe de microorganismes. Ainsi pour les bactéries le PCA a été utilisé, pour les champignons c'est le RBCA et pour les actinomycètes le AIA.

L'incubation s'est faite à 30° C pour la flore mésophile et à 55° C pour les microorganismes thermophiles. Le comptage des colonies a été effectué après deux jours d'incubation pour les bactéries et cinq jours pour les champignons et actinomycètes à l'aide du compteur "Quebec Colony Counter" (Darkfield Quebec Colony, model 3321, American Optical, Buffalo, États-unis). Seules les boîtes dont le nombre est compris entre 30 et 300 ont été retenues. Le nombre des UFC/g de compost a été calculé selon la méthode décrite dans le "Manual of Methods for General Bacteriology" (Gerhardt et al., 1981).

3.3 Numération de la flore cellulolytique durant le compostage

La méthode utilisée est basée sur le protocole de Pochon et al., (1962). Il s'agit d'un ensemencement avec des suspensions-dilutions de compost d'un milieu solide où la seule source de carbone est apportée par une feuille de papier filtre. Les germes cellulolytiques attaquent la fibre de papier.

De la gélose minérale est répartie dans des boîtes de Petri stériles. Des volumes de 0,1 ml des dilutions décimales préparées à partir d'un mélange d'une solution physiologique et de compost, sont répartis uniformément sur la surface avec un étaloir stérile. On recouvre cette surface avec une feuille de papier filtre stérile sans cendre (Wathman n° 1) en la faisant

adhérer au milieu gélosé. Les boîtes retournées sont incubées à 30° C. Le comptage de colonies se fait à la fin de la deuxième semaine d'incubation.

4. Analyse physico-chimique

4.1 Suivi de la température

La température de la matière a été mesurée 3 fois par jour à l'aide de thermocouples branchés à un appareil qui donne une lecture directe en °C \pm 1 (Omega Inc.DP. 460 Stamford, C.T. États-Unis). Dans chaque composteur deux thermocouples étaient placés continuellement au centre de la masse en profondeur et sur le côté en surface. Un thermomètre au mercure nous indiquait la température de la pièce.

4.2 Mesure de l'oxygène à l'intérieur du composteur

Une mesure de la quantité d'oxygène a été effectuée sur une base hebdomadaire à raison de 3 fois par jour. C'est une mesure directe grâce à une sonde (Logic Series Gas Detectors, États-Unis) placée en profondeur de la masse.

4.3 Mesure du pH

La mesure du pH de la matière a été effectuée à tous les sept jours selon une méthode typique pour le sol (Duchaufourt, 1967). Elle consiste à mélanger une quantité de matière

avec de l'eau déminéralisée dans un rapport 1 : 2. Dans tous les cas, 5g d'échantillon ont été mélangé à 10 ml d'eau

Le mélange repose ensuite pendant une période de 30 mn. Il est agité trois fois à toutes les dix minutes. La solution est agitée de nouveau avant d'y plonger l'électrode combinée du pH-mètre (Corning 30 États-Unis) préalablement calibrée avec des solutions tampons pH 7 et 4 (Baxter Diagnostics Corporation, Toronto Ontario, Canada).

4.4 Détermination du pourcentage d'humidité

Le pourcentage d'humidité a été déterminé une fois par semaine par passage d'une petite quantité d'échantillon (15g) dans un four (National Appliance Company, États Unis) pendant 24h à 105° C avant de le faire refroidir au dessiccateur pour une période de 15 minutes. L'échantillon est en suite pesé de nouveau. Le pourcentage d'humidité est calculé d'après la formule suivante après déduction du poids du creuset :

$$\% \text{ Humidité} = \frac{\text{Poids initial} - \text{Poids final}}{\text{Poids initial}} \times 100$$

4.5 Détermination du pourcentage de matière organique et du carbone

Le pourcentage de matière organique et de carbone ont été déterminé une fois par semaine selon la méthode tiré de "Méthodes d'analyses des sols, des fumiers et des tissus végétaux" (Conseil des productions végétaux du Québec, AGDEX 533, 1993). Elle est basée sur l'incinération de la matière. Le poids total des matières minérales que l'on appelle

généralement cendres, est déterminé en incinérant un poids connu de l'échantillon sec dans un four pré-chauffé à 550° C pour une durée de trois heures avant d'être refroidi au dessiccateur pendant 30 minutes. Le pourcentage de matière organique (M.O) est déterminé selon la formule suivante :

$$\% \text{ M.O} = \frac{\text{Poids sec} - \text{Poids cendres}}{\text{Poids sec}} \times 100$$

Puisque la fraction moyenne de carbone contenu dans la matière organique est de 1,8, le pourcentage de carbone (C) contenu dans l'échantillon se calcule selon la formule suivante :

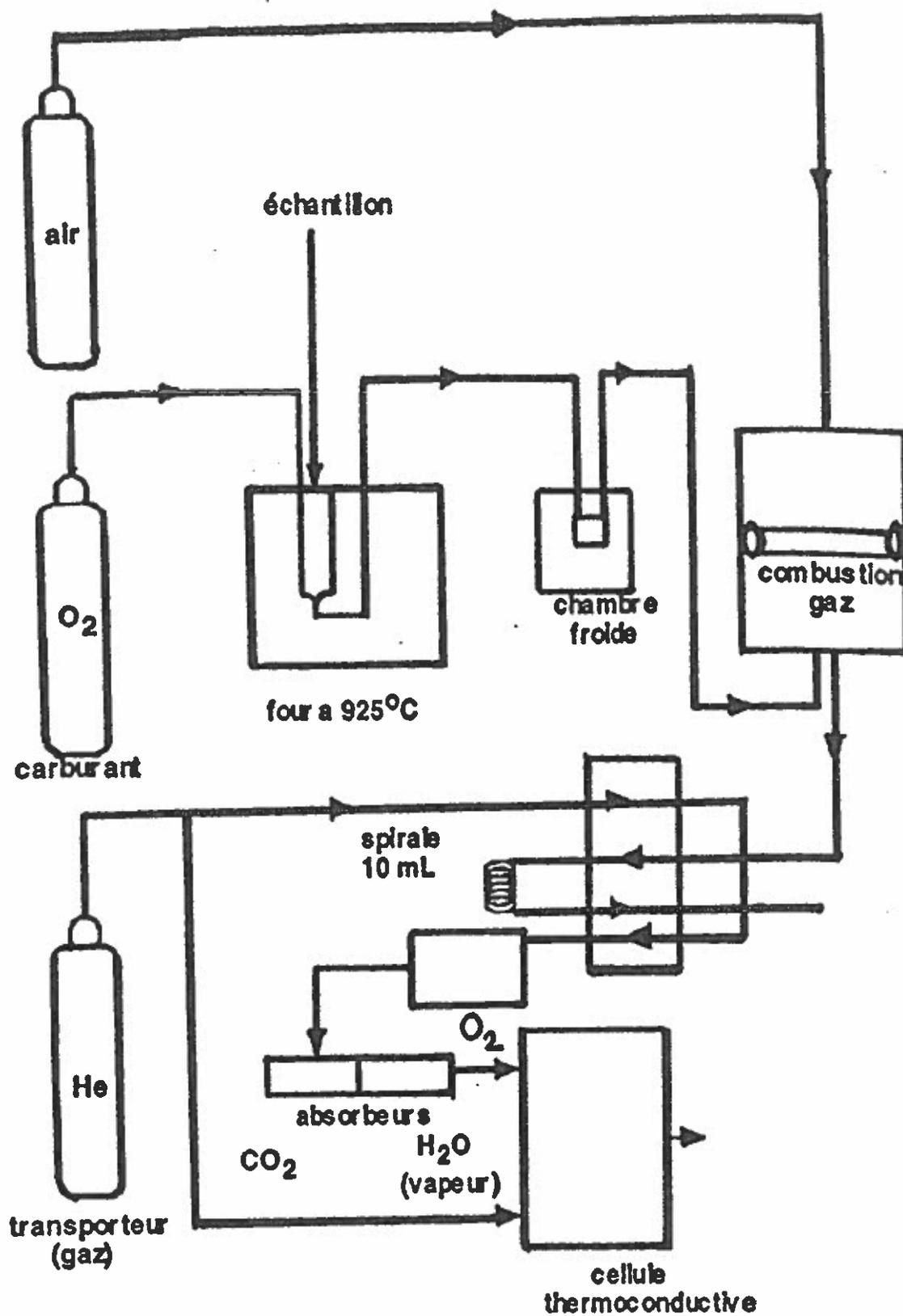
$$\% \text{ C} = \% \text{ M.O} / 1,8$$

4.6 Détermination du pourcentage d'azote totale

Le pourcentage d'azote est déterminé directement en plaçant les échantillons (0.15g) dans un Nitrogen Analyser (Leco, Cie. États-Unis).

Une représentation schématique de l'analyse est montrée dans la figure 7. L'échantillon est destiné à une combustion à 925° C. L'air de combustion essentiellement composé de CO₂, N₂, O₂ et de vapeur d'eau, est conduit par le gaz hélium à travers l'O₂, le CO et les absorbeurs de vapeur d'eau. Le gaz final restant est le N₂ qui passe par une cellule thermoconductive. La différence entre N₂ et He est enregistrée puis exprimée en pourcentage d'azote sur la base du poids sec.

Figure 6 : Schéma simplifié de l'analyse d'azote



4.7 Détermination de la cellulose

Il s'agit d'une méthode tirée du manuel "Biochemistry Analytical" décrite par Updegraff, (1969). Elle est applicable pour la détermination de la cellulose dans les cultures microbiennes, les produits de pâtes et papiers ainsi que d'autres matériels biologiques. Un échantillon de 30mg est séché dans un four à 105° C pendant 24 heures. Une extraction à l'aide d'un réactif acétique/ nitrique (125 ml acide acétique à 80% + 12,5 ml acide nitrique concentré) est effectuée. Après 45 mn. d'ébullition, la solution est centrifugée durant 20 mn. à 12000 rpm. Le culot est récupéré et la cellulose qui reste est dissoute dans 3 ml. d'acide sulfurique à 67% puis déterminée par le réactif anthrone (0,2gr./ 10 ml H₂SO₄ concentré) préalablement refroidit à 4° C. 2 h avant manipulation. Une lecture de D.O. à 620 nm est faite une heure après refroidissement. Une courbe standard est réalisée avec une solution stock de cellulose à 300 ug /l . Le calcul se fait selon la formule suivante :

$$\text{concentration (ug /0,5 ml) cellulose} \times 2 \times \text{dilution} = \text{concentration (ug) cellulose dans 30mg de substrat de départ.}$$

4.8 Dosage de la demande chimique en oxygène

La DCO a été déterminée directement en utilisant la trousse à DCO de la compagnie Hach. Un échantillon de 1g de boue est homogénéisé dans 100 ml d'eau déminéralisée dans l'Osterizer. 2 ml de l'échantillon pur ou dilué sont introduit dans les tubes de réactifs (0-1500 ppm O₂/ L). Ces derniers sont placés dans le réacteur à DCO modèle "45600 Hach

Cie.”(Lovland, Colorado, États-Unis) à une température de 150° C. durant une heure. Une lecture de D.O. est effectuée à une longueur d’onde de 615 nm.

4.9 Analyse statistique

Les logiciels de traitement de données Microsoft-Excel, version 5.0 et Micro-cal Origin version 2.0 sont utilisés afin d’accomplir une partie du traitement statistique (moyenne, variance). Le calcul d’erreur sur la mesure est donné par la déviation standard. Comme il s’agit d’un petit nombre d’échantillons ($n = 2$ ou $n = 3$), la formule utilisée est la suivante :

$$S_x = \text{Racine carré } ((\sum x^2 - x_{\text{moy}})^2 / (n-1))$$

L’autre partie de l’analyse statistique des résultats est traitée au département de statistique (Épidémiologie, IAF) afin de vérifier si la différence entre l’inoculation au jours 0 et 14 est significative. Le logiciel SPSS version 5.0 (SPSS Chicago, États-Unis) a été utilisé.

RÉSULTATS

1. Analyse microbiologique

1.1 Élaboration de l'inoculum

1.1.1 Isolement et sélection de microorganismes

Après une incubation de trois et sept jours d'un mélange de boues primaires et secondaires, nous avons isolé 4 souches de bactéries et 3 souches d'actinomycètes .

Les actinomycètes retenues sont ceux qui présentent une activité cellulolytique.

1.1.2 Composition du consortium microbien

Quelques caractéristiques des souches isolées à partir des boues papetières et qui constituent l'inoculum sont présentées au tableau 8.

Tableau 8 : Caractéristiques du consortium microbien.

# Souches	Organismes	Gram	Morphologie	Température (°C)	Milieu de croissance
1	Actinomycète ¹	+	Filamenteuse	30/55	Benet's
2	Bactérie ¹	-	Bâtonnets	30	PCA
3	Bactérie ¹	-	Coques	30	PCA
4	Actinomycète ¹	+	Filamenteuse + spores terminal	30/55	Benet's
5	Bactérie ¹	+	Bâtonnet	30/55	PCA
6	Bactérie ¹	+	Bâtonnet	55	PCA
7	Actinomycète ¹	+	Filamenteuse	30/55	Benet's
8	Bactéries mixtes ²			55	1386 ⁴
9	Champignon ³			30	200 ⁴

1: Souches isolées à partir des boues papetières. 2: Bactéries mixtes non identifiées (ATCC 31205).
3: Champignon : *Pleurotus ostreatus* (ATCC 58052). 4: Milieux recommandés par l'ATCC.

1.2 Numération des microorganismes durant le compostage

Le dénombrement des UFC (exprimé en log UFC/g) durant le compostage sont représentées dans les tableaux 9 et 10 et les figures 7 (a, b et c) et 8 (a, b et c). Les UFC/g des essais n°2 et 3 sont une moyenne des valeurs obtenues à partir de deux échantillons provenant de lot contenant la même proportion de boues primaires et secondaires (50%-50%). Il s'agit des lots 3 et 4.

1.3 Numération de la flore cellulolytique durant le compostage

Le tableau 11 permet de constater l'évolution de la flore cellulolytique dans chaque composteur. Seules les colonies dont le nombre est compris entre 30 et 300 sont représentées et exprimées en log UFC/g dans les figures 9 et 10

Tableau 9 : Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cours du compostage (essai n° 2).

		Jours						
		0	7	14	21	28	35	42
Composteur A (inoculé au début du processus)								
Bactéries	mésophiles	7,90	8,49	8,77	7,69	8,60	8,90	8,96
	thermophiles	6,60	9,60	7,84	8,25	8,72	8,10	7,67
Champignons	mésophiles	< 2,84	< 3,07	< 3,23	4,46	5,91	5,94	5,95
	thermophiles	< 0,69	< 0,69	< 0,69	3,63	3,59	3,79	< 0,69
Actinomycètes	mésophiles	6,54	7,27	7,30	7,26	6,74	5,63	5,63
	thermophiles	4,00	7,17	7,11	6,69	6,78	7,04	6,70
Composteur B (inoculé après la phase thermophile)								
Bactéries	mésophiles	7,69	8,40	8,89	8,65	8,51	9,05	8,02
	thermophiles	6,67	9,48	7,68	8,40	8,95	9,00	7,62
Champignons	mésophiles	< 0,69	< 0,69	< 0,69	< 3,39	5,77	5,91	6,00
	thermophiles	< 0,69	< 0,69	< 0,69	< 0,69	3,78	3,84	< 0,69
Actinomycètes	mésophiles	6,60	6,68	6,61	6,85	6,53	6,58	5,98
	thermophiles	4,00	6,94	7,24	7,18	6,56	6,98	6,34
Composteur C (témoin)								
Bactéries	mésophiles	7,75	8,25	8,82	7,94	7,23	7,78	7,58
	thermophiles	6,53	8,35	7,72	7,17	7,16	7,43	7,46
Champignons	mésophiles	< 0,69	< 0,69	< 0,69	< 0,69	< 2,84	5,78	5,84
	thermophiles	< 0,69	< 0,69	< 0,69	< 0,69	< 0,69	3,59	< 0,69
Actinomycètes	mésophiles	6,46	6,78	6,69	6,60	5,17	5,53	5,56
	thermophiles	4,00	6,95	7,12	6,82	6,57	6,17	5,91

Lot n° 2 : mélange de 65% de boues primaires et 35% de boues secondaires.

Tableau 10 : Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cours du compostage (essai n° 3 et 4).

Composteur A (inoculé au début du processus)		Jours						
		0	7	14	21	28	35	42
Bactéries	mésophiles	8,25	9,10	9,39	9,51	10,02	9,17	8,90
	thermophiles	7,06	9,91	10,00	9,47	9,88	9,19	8,69
Champignons	mésophiles	< 1,70	< 3,09	< 3,39	5,58	7,45	8,00	6,22
	thermophiles	< 0,69	< 0,69	< 0,69	3,57	7,00	3,56	< 0,69
Actinomycètes	mésophiles	6,84	8,33	7,30	7,30	7,37	6,96	6,88
	thermophiles	4,84	7,16	7,19	7,10	7,38	6,85	6,77

Composteur B (inoculé après la phase thermophile)		Jours						
		0	7	14	21	28	35	42
Bactéries	mésophiles	7,82	8,77	9,84	10,12	10,39	9,27	8,96
	thermophiles	6,91	9,85	9,34	9,91	10,43	9,07	8,82
Champignons	mésophiles	< 0,69	< 0,69	< 2	5,56	7,49	8,26	6,30
	thermophiles	< 0,69	< 0,69	< 0,69	3,46	6,75	3,68	< 0,69
Actinomycètes	mésophiles	6,76	7,16	7,23	7,38	6,03	7,36	7,00
	thermophiles	4,56	7,00	6,91	7,32	5,82	7,25	6,82

Composteur C (témoin)		Jours						
		0	7	14	21	28	35	42
Bactéries	mésophiles	7,85	8,91	8,24	9,08	9,33	8,97	8,85
	thermophiles	6,95	9,78	8,24	8,90	9,01	8,88	8,75
Champignons	mésophiles	< 0,69	< 0,69	< 0,69	3,46	7,32	7,36	7,30
	thermophiles	< 0,69	< 0,69	< 0,69	< 0,69	7,15	3,47	< 0,69
Actinomycètes	mésophiles	6,82	8,20	6,91	6,23	6,00	5,87	5,75
	thermophiles	4,68	7,07	6,91	6,75	5,78	5,60	5,49

Les UFC = moyenne des valeurs de deux échantillons, lots n° 3 et 4 (mélange de 50% de boues primaires et 50% de boues secondaires).

Tableau 11 : Évolution de la flore cellulolytique (log UFC/g) au cours du compostage.

Essai n° 2	Composteurs			
	Jours	A	B	C
	0	< 2	< 0,69	< 0,69
	7	< 2,84	< 0,69	< 0,69
	14	4,15	4,05	< 0,69
	21	6,91	7,11	4,68
	28	7,4	7,43	7
	35	8,68	8,94	7,21
	42	8,48	8,92	7,39

Essai n° 3 et 4	Composteurs			
	Jours	A	B	C
	0	< 3,07	< 0,69	< 0,69
	7	< 3,43	< 0,69	< 0,69
	14	4,07	3,82	< 0,69
	21	6,49	7,04	3,6
	28	7,19	7,08	6,84
	35	8,76	8,88	7
	42	8,56	8,78	7,16

A : composteur inoculé au début du processus.

B : composteur inoculé après la phase thermophile.

C : composteur témoin.

Lot n° 2 : mélange de 65% de boues primaires et 35 % de boues secondaires.

Lot n° 3 et 4 : -mélange de 50% de boues primaires et 50% de boues secondaires.

-les UFC = moyenne de deux échantillons.

Figure 7 a : Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cours du compostage (composteur A, lot n ° 2).

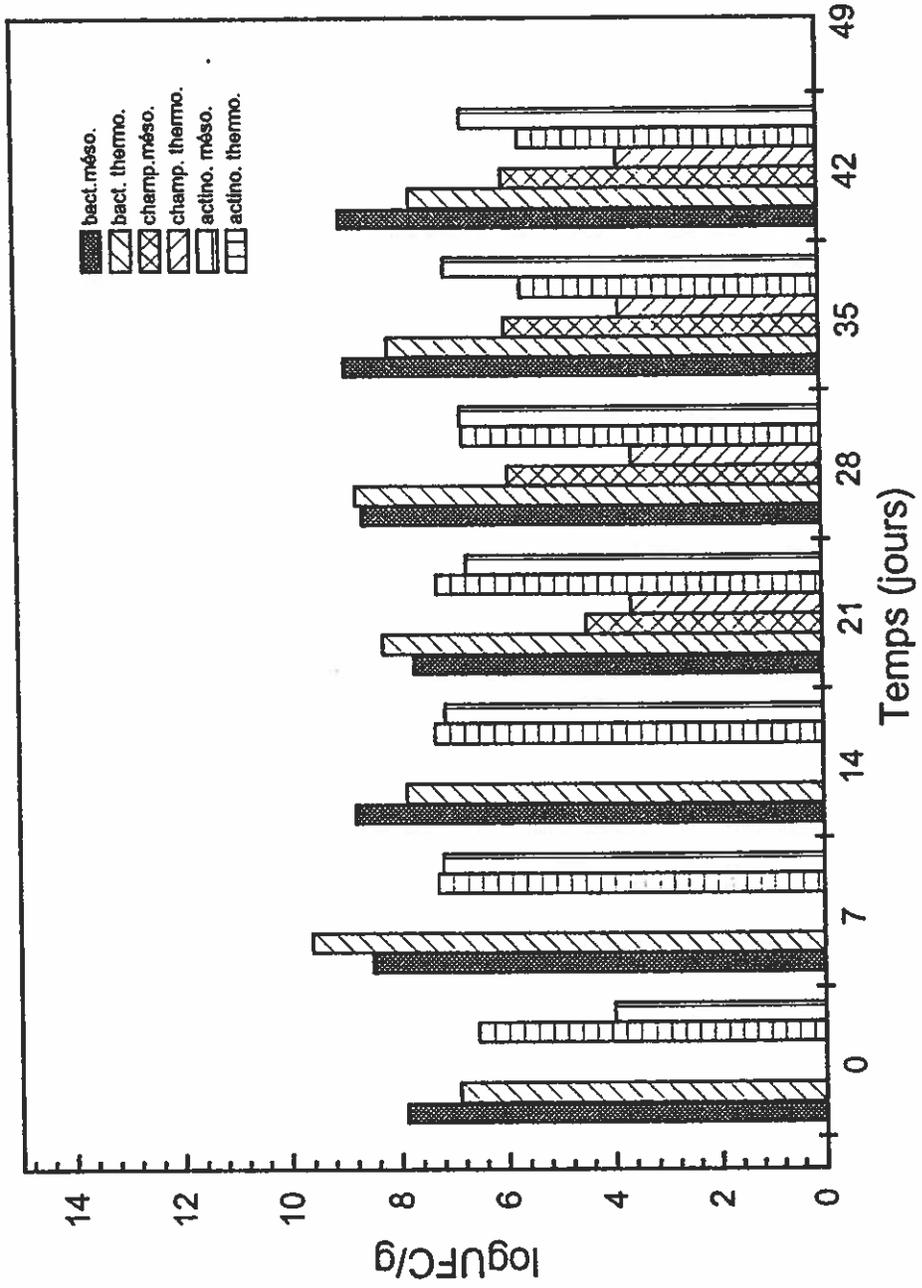


Figure 7 b : Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cours du compostage (composteur B, lot n ° 2).

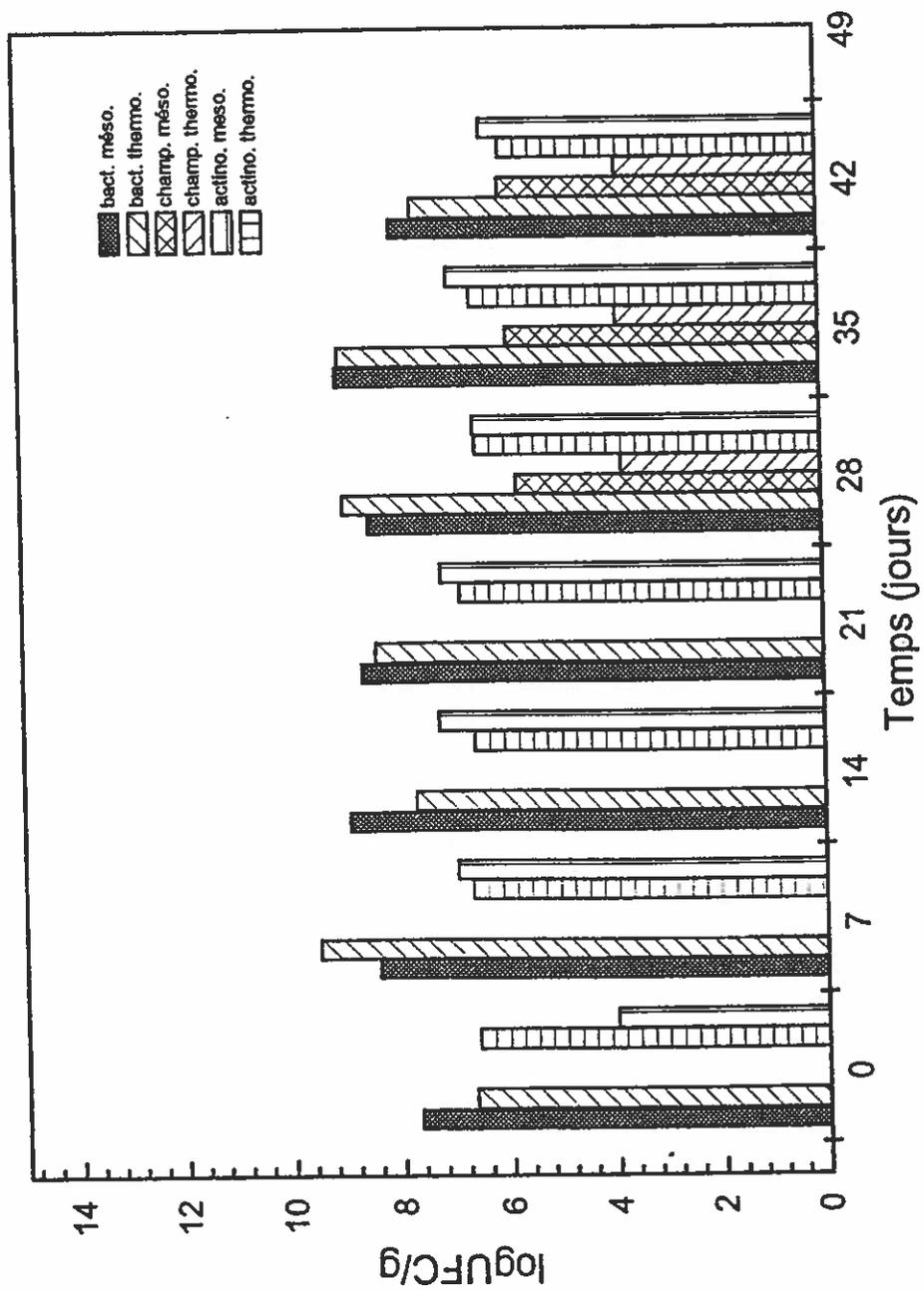


Figure 7 c : Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cours du compostage (composteur C, lot n ° 2).

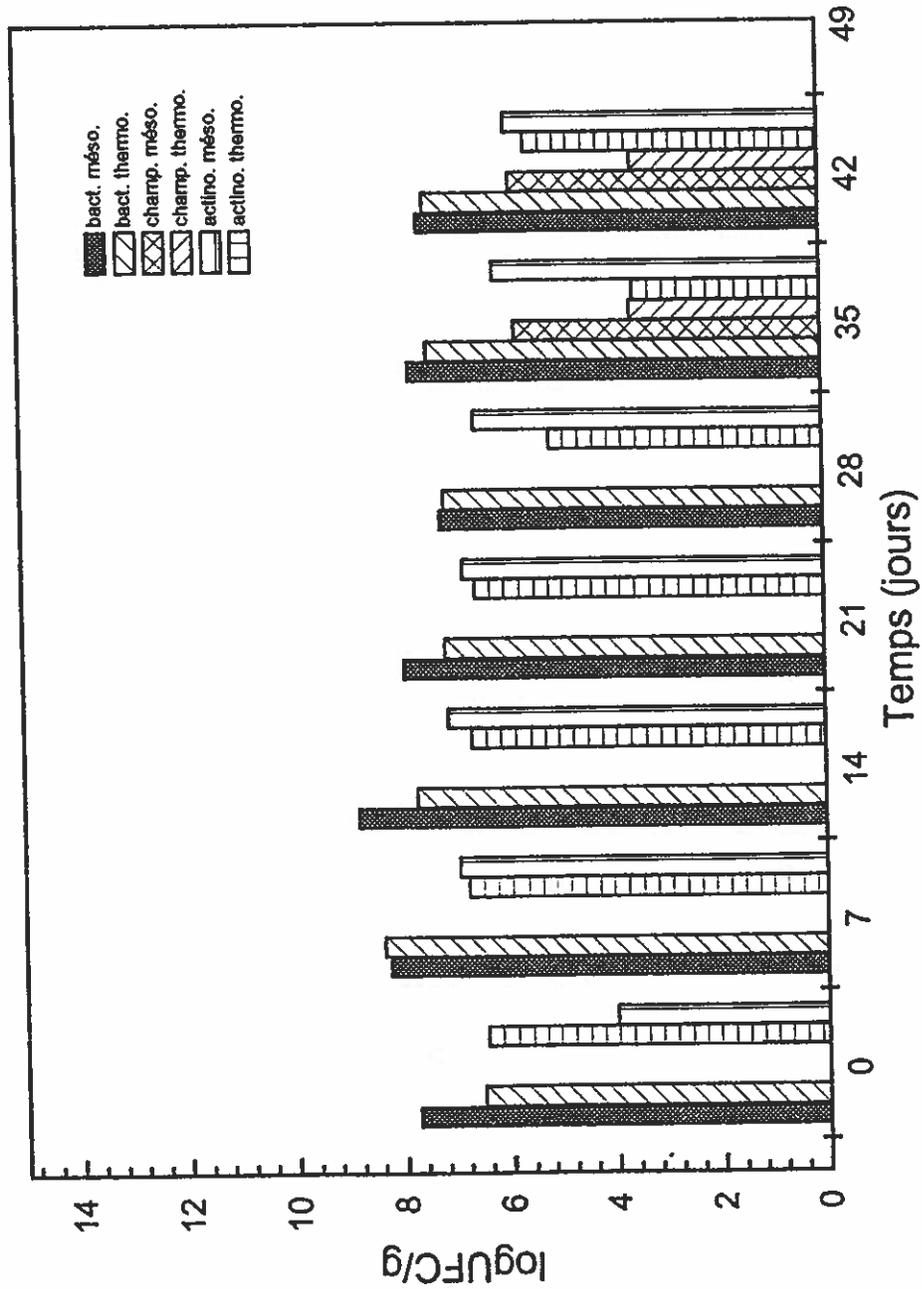


Figure 8 a : Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cours du compostage (composteur A, lots n° 3 et 4)

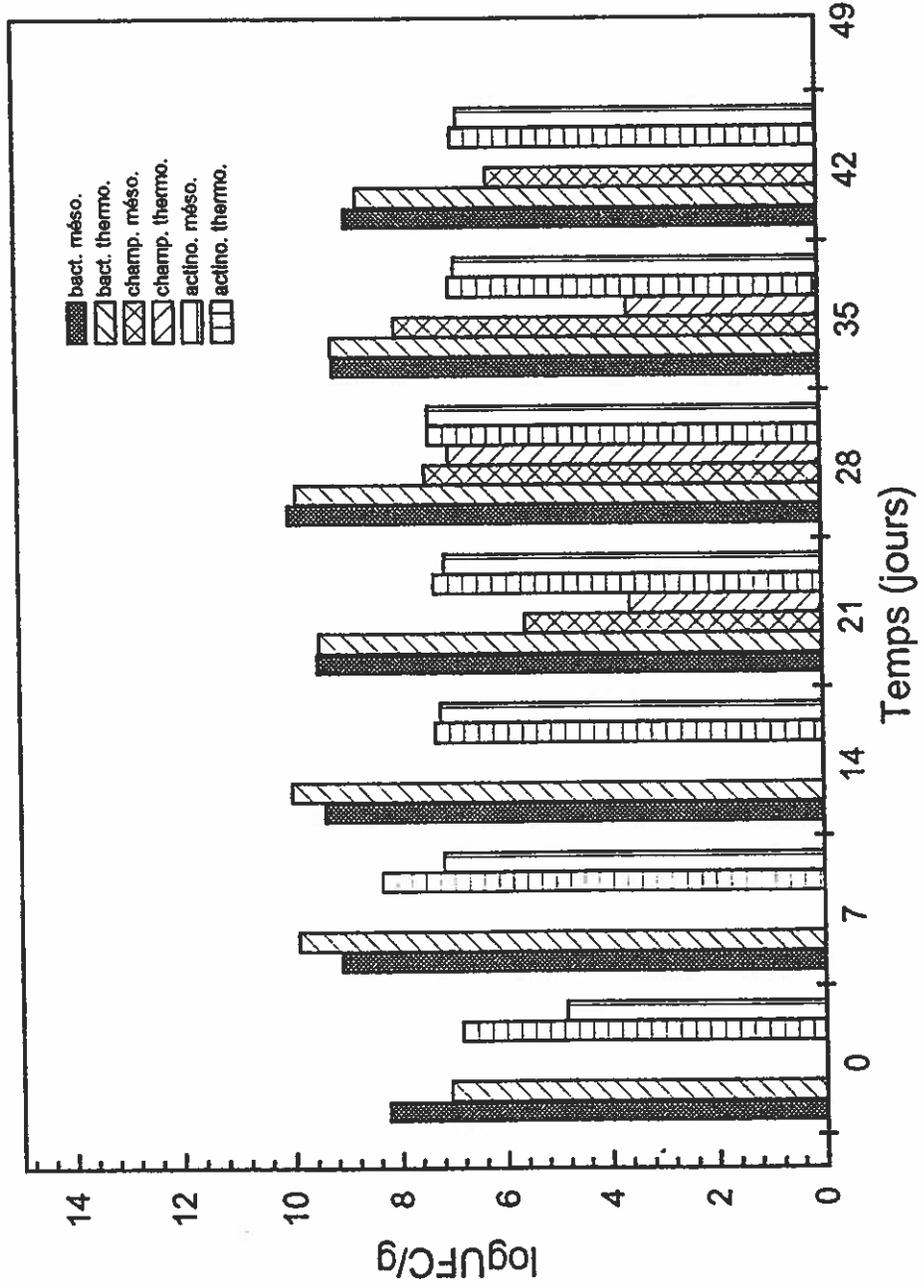


Figure 8 b : Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cours du compostage (composteur B, lots n° 3 et 4)

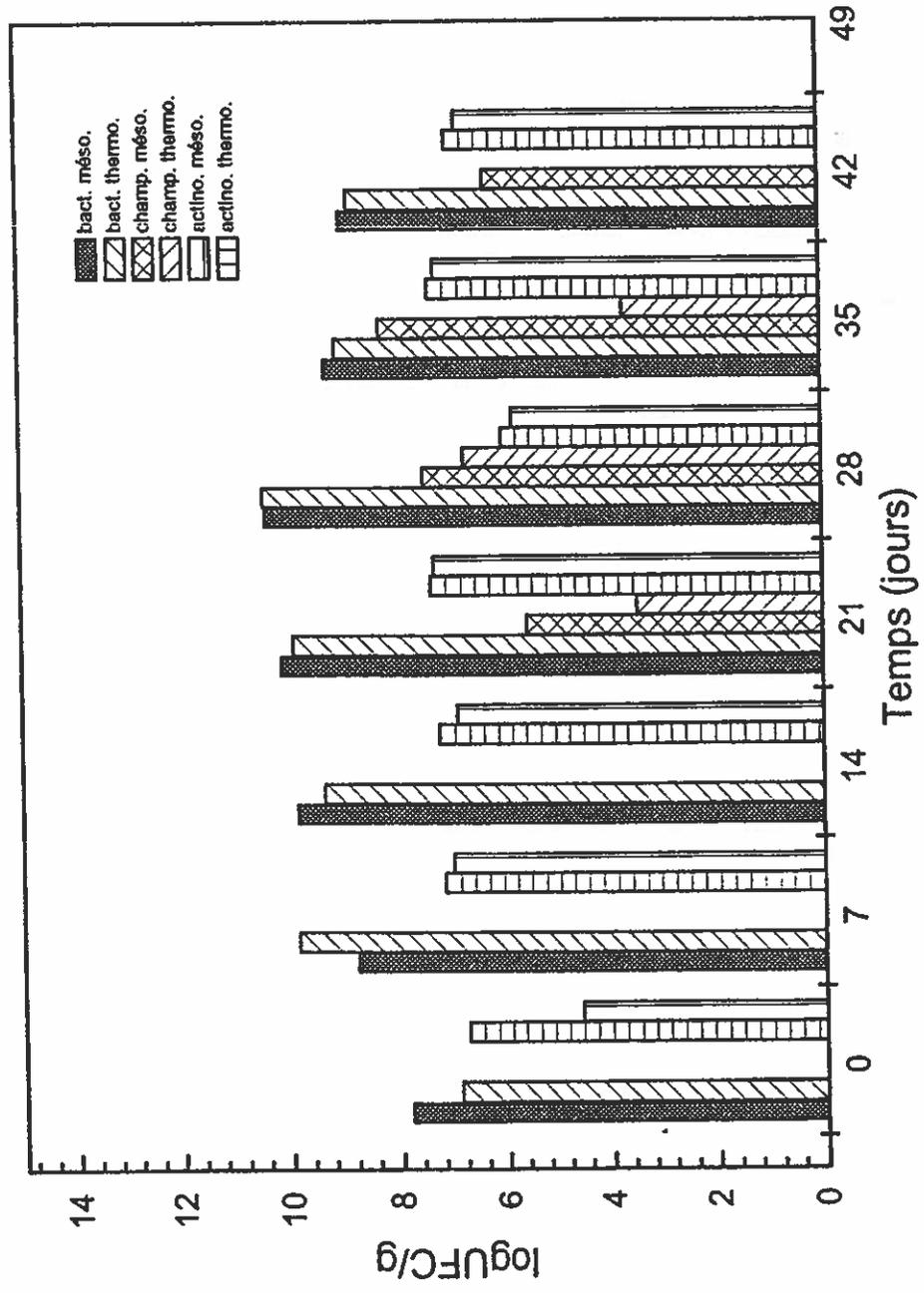


Figure 8 c : Évolution du nombre d'unités formatrices de colonies (log UFC/g) au cours du compostage (composteur C, lots n° 3 et 4)

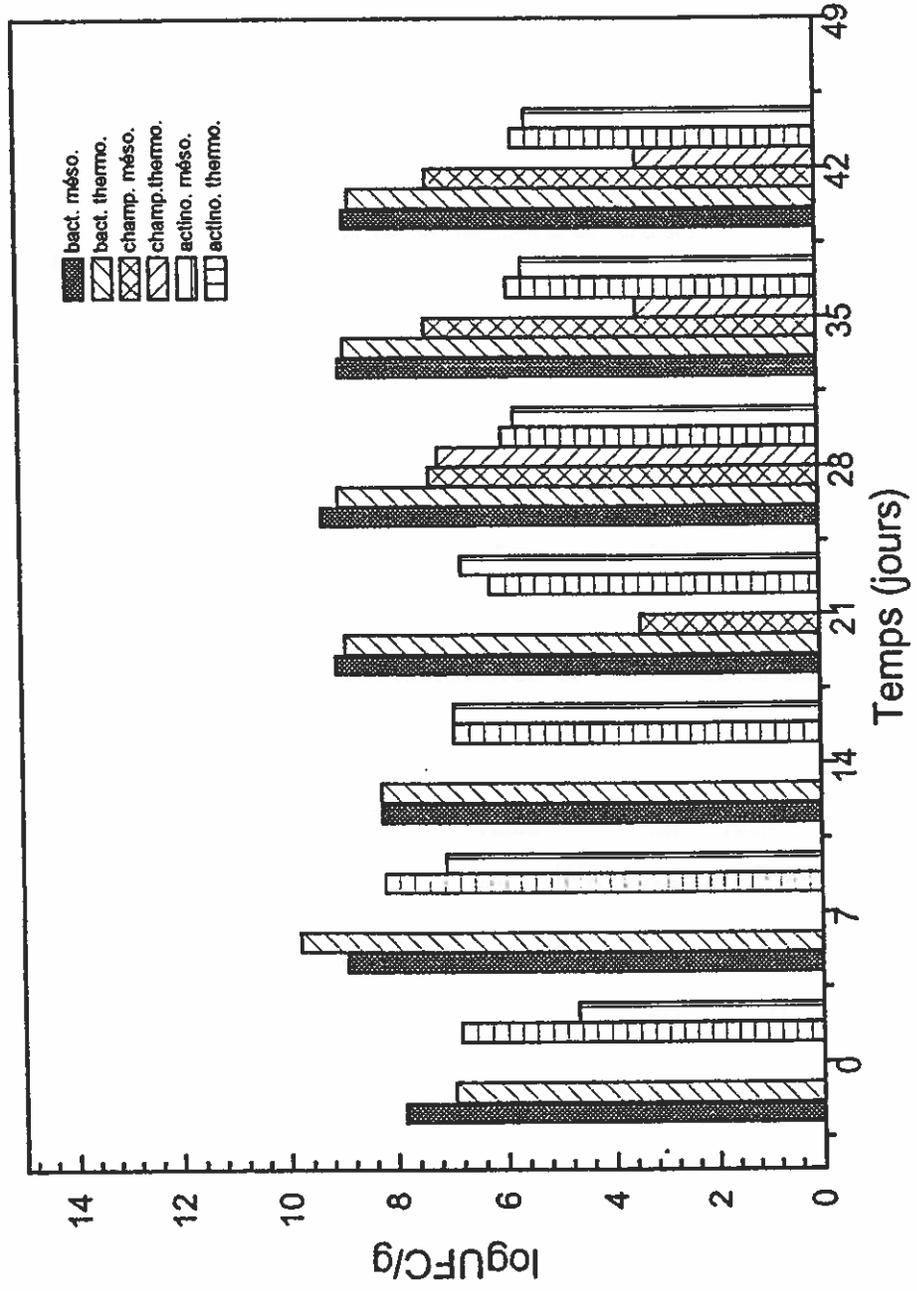


Figure 9 : Évolution de la flore cellulolytique (log UFC/g) au cours du compostage
(lot n° 2)

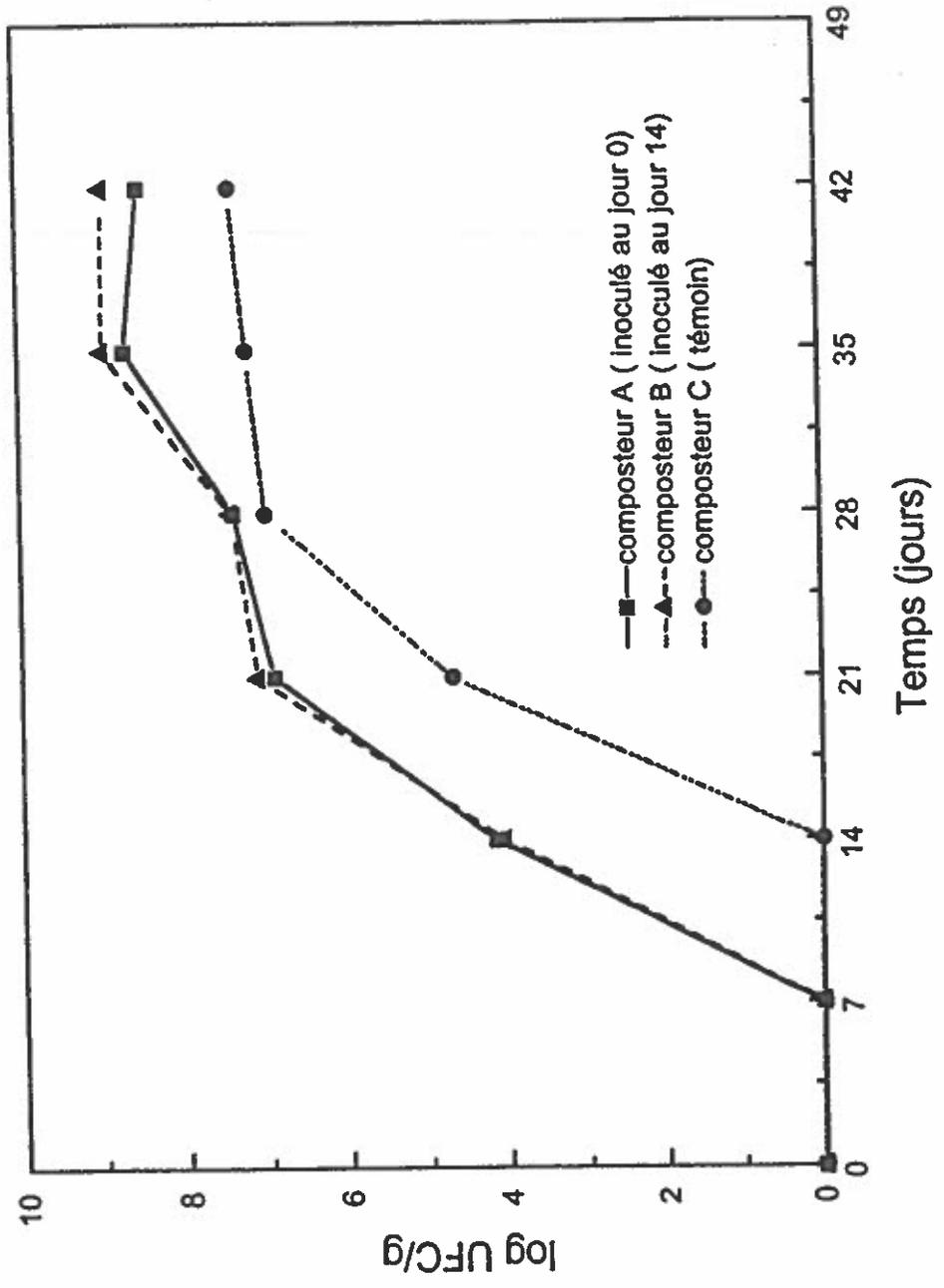
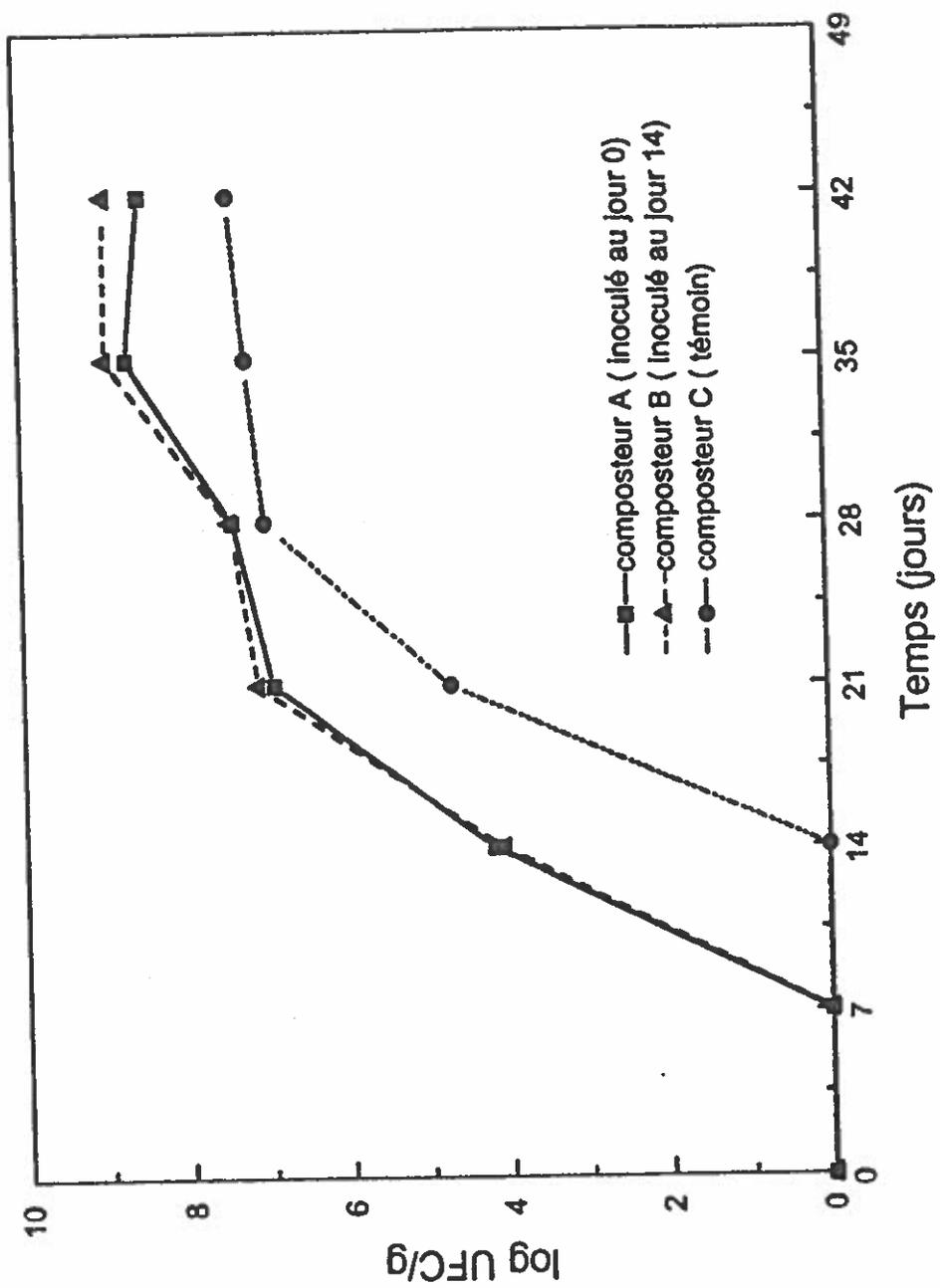


Figure 10 : Évolution de la flore cellulolytique (log UFC/g) au cours du compostage (lots n° 3 et 4)



2. Analyse physico-chimique

2.1 Température - oxygène

Essai n° 1 :

L'essai de compostage n° 1 a été réalisé sans inoculation. La figure 11 illustre l'évolution de la température dans deux composteurs; A isolé et B non isolé, en fonction du temps et sur une période de 42 jours. Les températures maximales dans les composteurs A et B sont, respectivement de 64° et 51° C. Les températures maximales sont atteintes plus tôt dans le composteur A isolé par rapport au composteur B non isolé (5 jours vs 7 jours). De plus on constate que la phase de dégradation chaude dure plus longtemps (7 jours) dans le composteur A par rapport au composteur B (5 jours).

Essais n° 2, 3 et 4 :

Les essais de compostage sont réalisés avec des souches inoculées en début du processus de compostage, et après la phase thermophile et comportent un cas témoin (non inoculé).

Les figures 12 (a, b et c) et 13 (a, b, et c) qui suivent nous permettent d'observer les courbes de température et d'oxygène régnant à l'intérieur des différents composteurs lors des essais de compostage avec inoculation. Les températures maximales sont atteintes plus rapidement, soit le troisième jour de compostage dans le composteur A (figures 12 a et 13 a) comparé aux composteurs B et C où les températures maximales sont atteintes en moyenne après 5 jours de compostage (figures 12 b, c, et 13 b, c). Les températures maximales moyennes dans les composteurs A, B et C sont respectivement de 63°, 59° et 60° C.

La phase thermophile dure en moyenne 13, 11 et 9 jours respectivement dans les composteurs A, B et C.

L'observation des courbes (figures 12 (a et b) et 13 (a et b)) permet de relever un phénomène important non observé dans les courbes des figures 12 c et 13 c. Il s'agit de la petite remontée en température qui survient aux environs du 30^e jour de compostage.

En ce qui concerne les courbes d'oxygène, on remarque que la tendance est la même à savoir, une chute brutale de l'oxygène jusqu'à 1 et 4% qui s'effectue entre les jours 0 et 3, et ceci malgré l'apport d'oxygène sous forme d'aération et de retournement de la matière. La diminution de la concentration en oxygène est inversement proportionnelle à la montée en température. Au niveau des courbes des figures 12 (a, b, c) et 13 (a, b, c) on constate que la concentration d'oxygène décroît avec la montée de la température et augmente avec la diminution de la température.

Figure 11 : Évolution de la température dans le composteur A et B (lot n° 1).

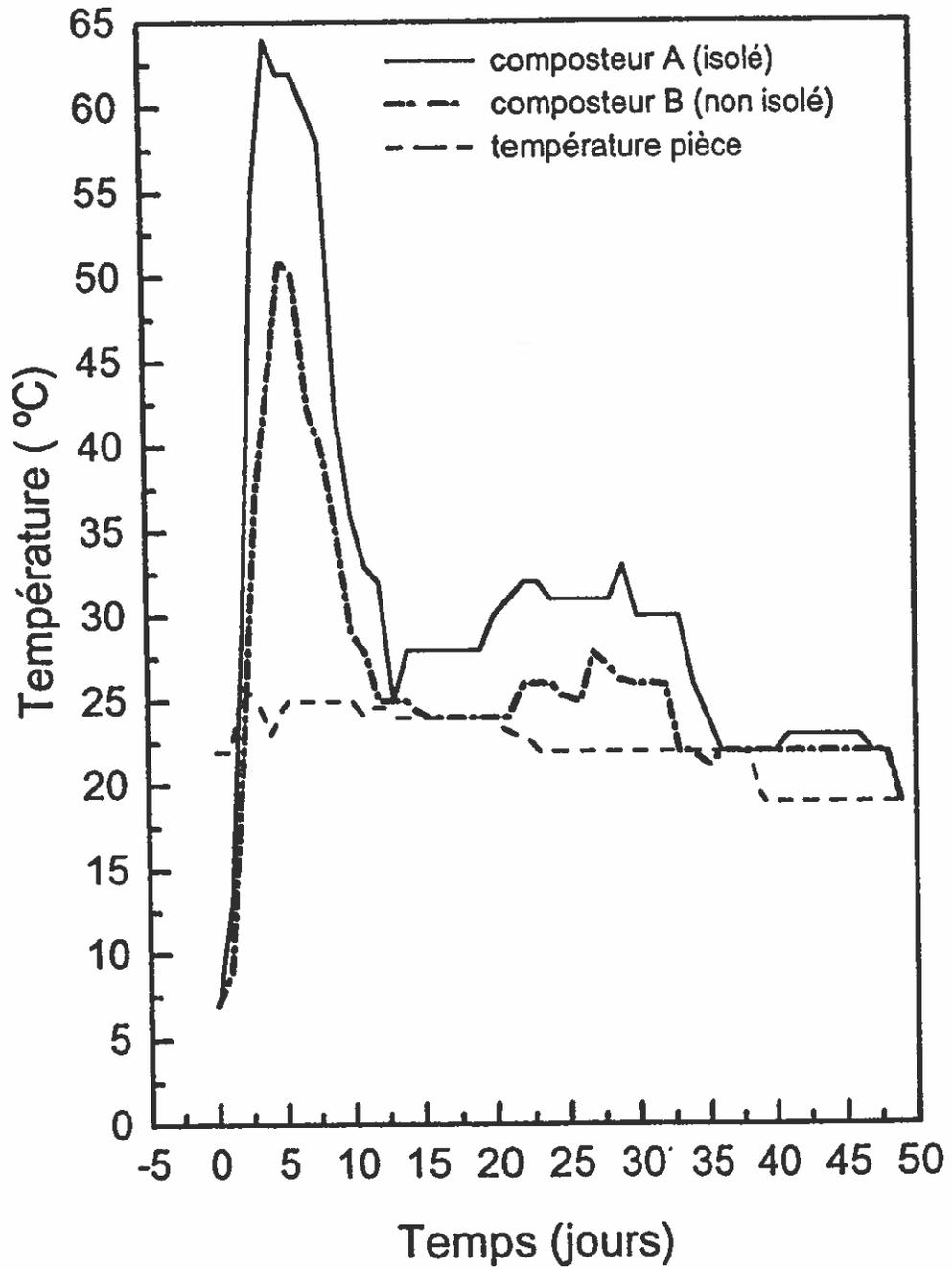


Figure 12 a : Évolution de la température et de l'oxygène au cours du compostage
(composteur A, lot n° 2).

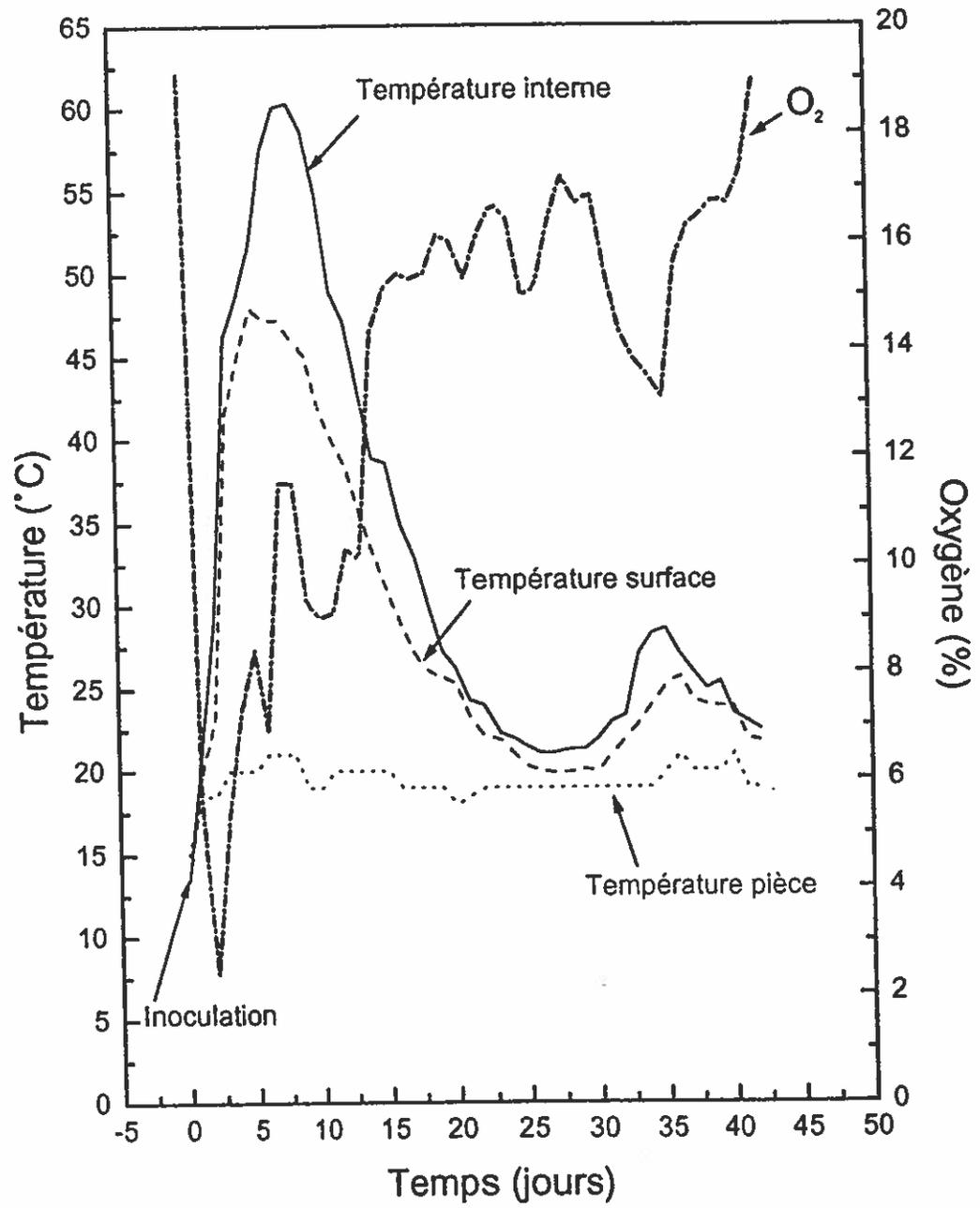


Figure 12 b : Évolution de la température et de l'oxygène au cours du compostage (composteur B, lot n° 2).

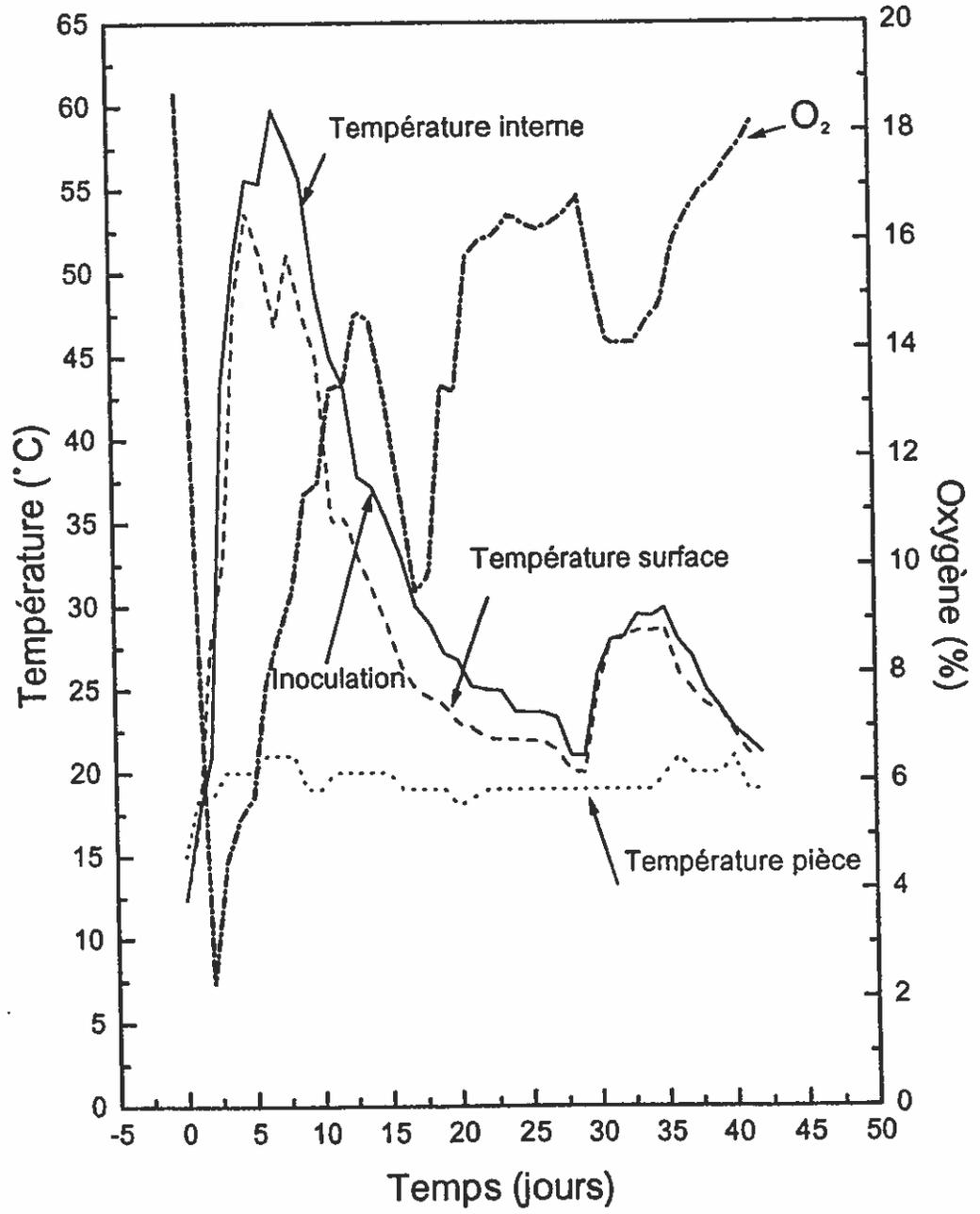


Figure 12 c : Évolution de la température et de l'oxygène au cours du compostage (composteur C, lot n° 2).

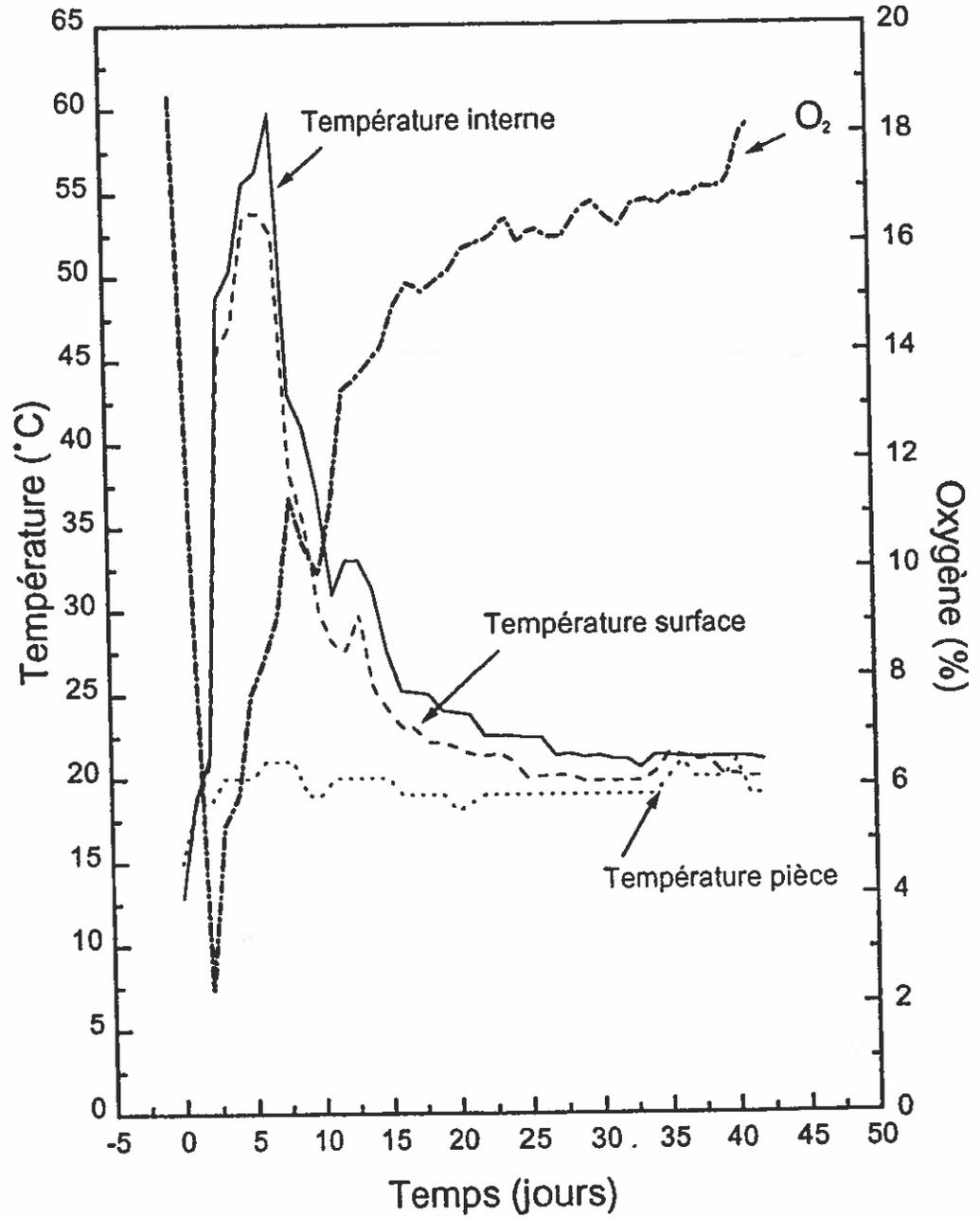


Figure 13 a : Évolution de la température et de l'oxygène au cours du compostage
(composteur A, lots n° 3 et 4)

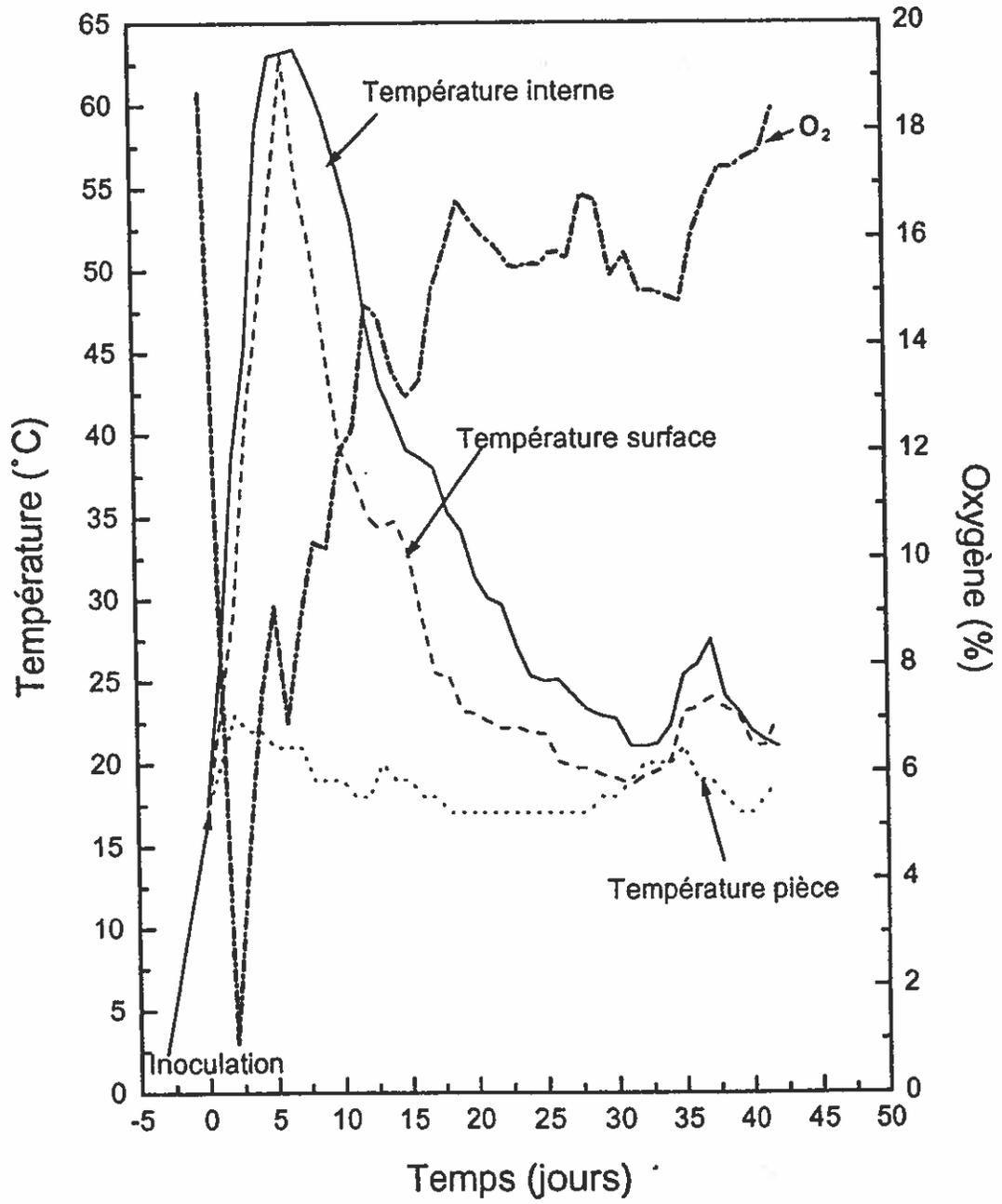


Figure 13 b : Évolution de la température et de l'oxygène au cours du compostage
(composteur B, lots n° 3 et 4)

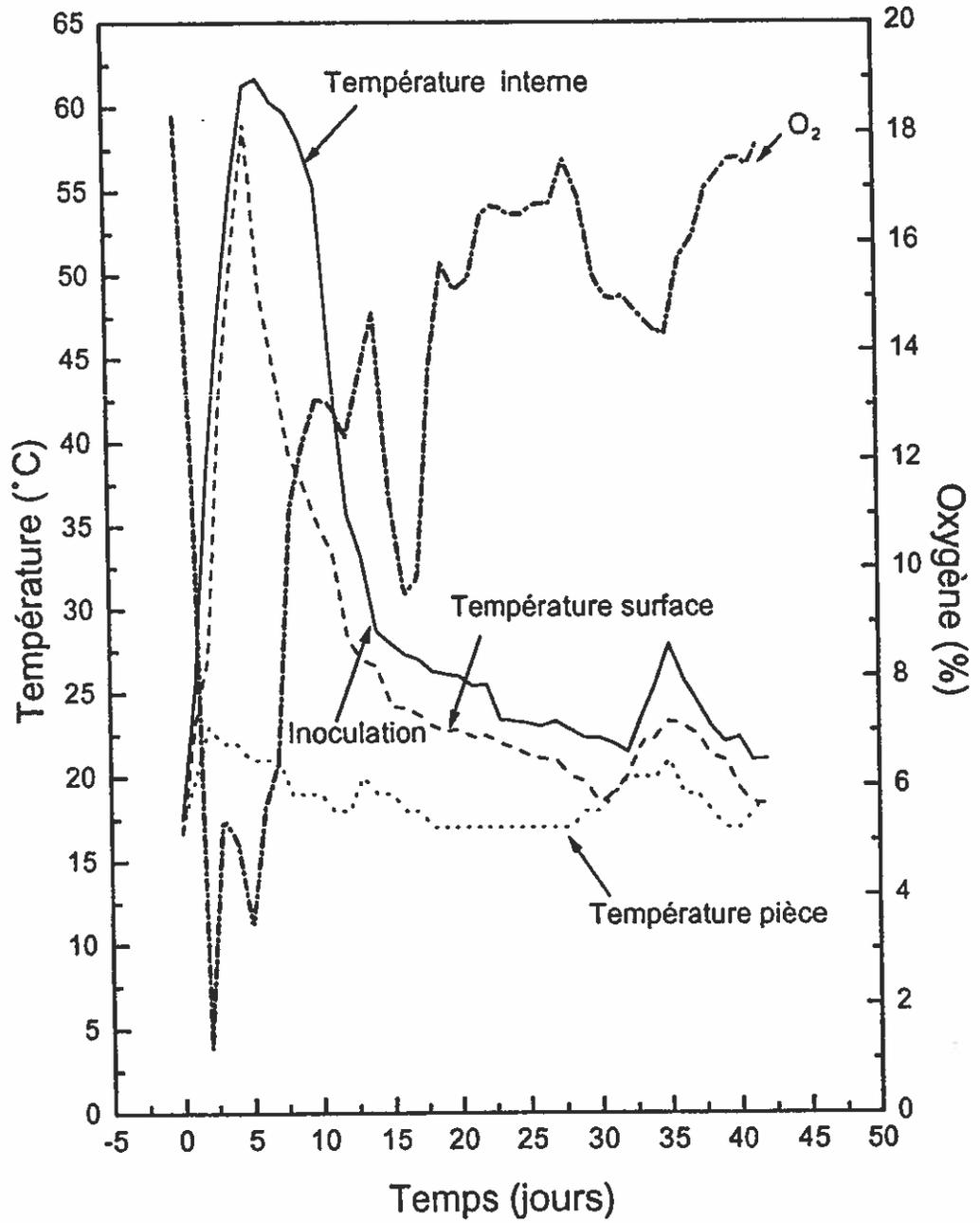
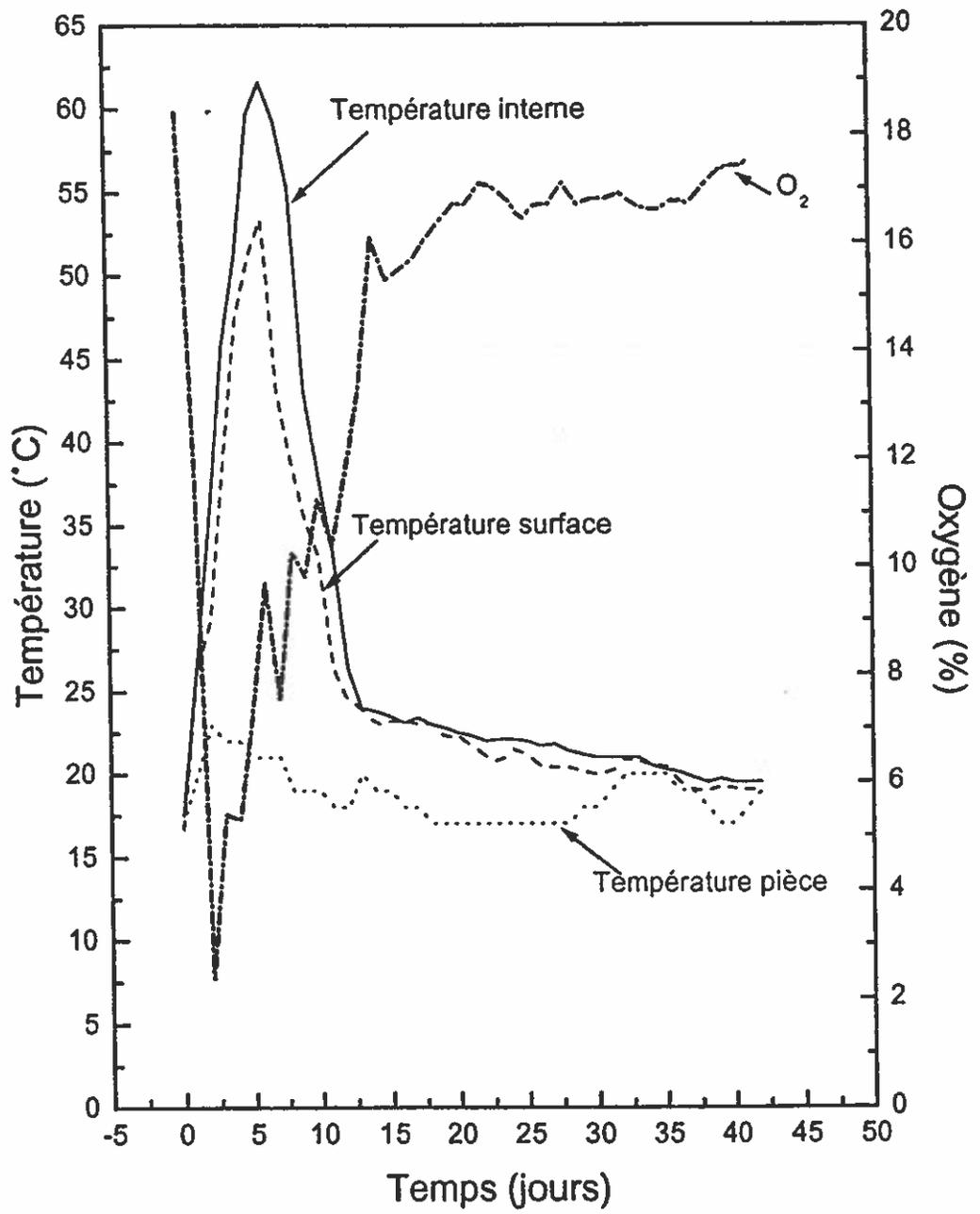


Figure 13 c : Évolution de la température et de l'oxygène au cours du compostage
(composteur C, lots n° 3 et 4)



2.2 Le pH

Le pH initial du mélange des boues papetières varie de 6,3 à 8,4 (figures 14, 15 et 16). Quelque soit le pH initial, celui-ci a tendance à augmenter graduellement durant la phase thermophile. Après 42 jours de compostage, on atteint des valeurs du pH près de la neutralité (figure 14) ou légèrement acide (figure 15 et 16).

2.3 Humidité

La teneur d'eau initiale contenue dans les différentes proportions de mélange de boues primaires et secondaires (80%- 80%, 65%- 35%, et 50%- 50%) est respectivement de 65%, 68% et 67% pour les lots n° 1, 2, 3 et 4 (figures 17, 18, et 19). À noter que les lots 3 et 4 ont la même proportion de mélange de boues primaires et secondaires.

En moyenne après 21 jours de compostage la teneur en eau a tendance à augmenter dans les différents composteurs. L'observation des courbes (figures 18 et 19) nous permet de constater une augmentation de la teneur en eau au jour 14 dans le composteur B. Le pic correspond au jour où l'inoculation dans le composteur B a été effectuée.

2.4 Rapport C/N

Le rapport C/N initial du mélange de boues papetières est respectivement de 33, 26 et 23 pour les lots 1, 2, 3 et 4. Les courbes des figures 20, 21 et 22 illustrent l'évolution du rapport

Figure 14 : Évolution du pH au cours du compostage (lot n° 1)

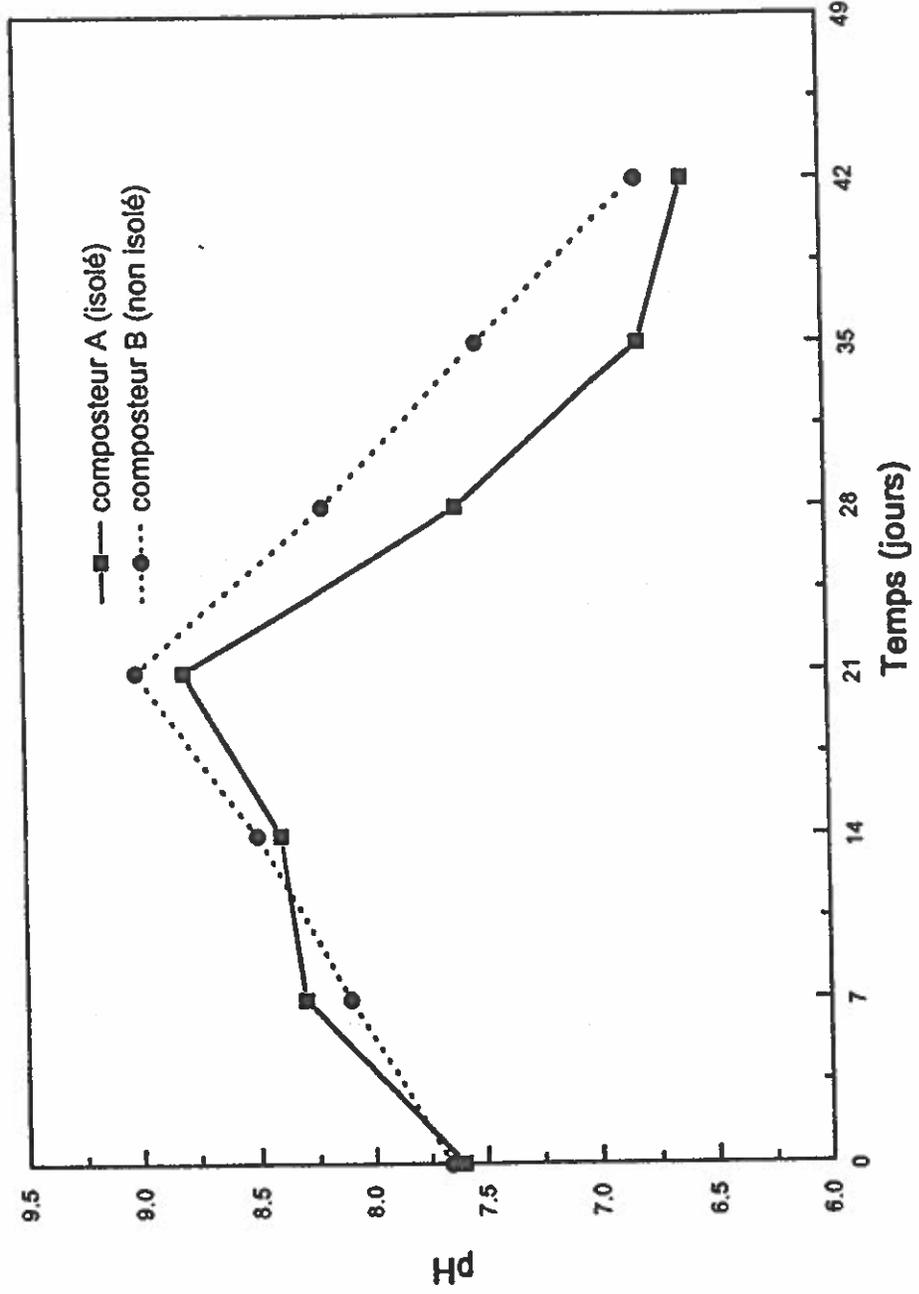


Figure 15 : Évolution du pH au cours du compostage (lot n° 2).

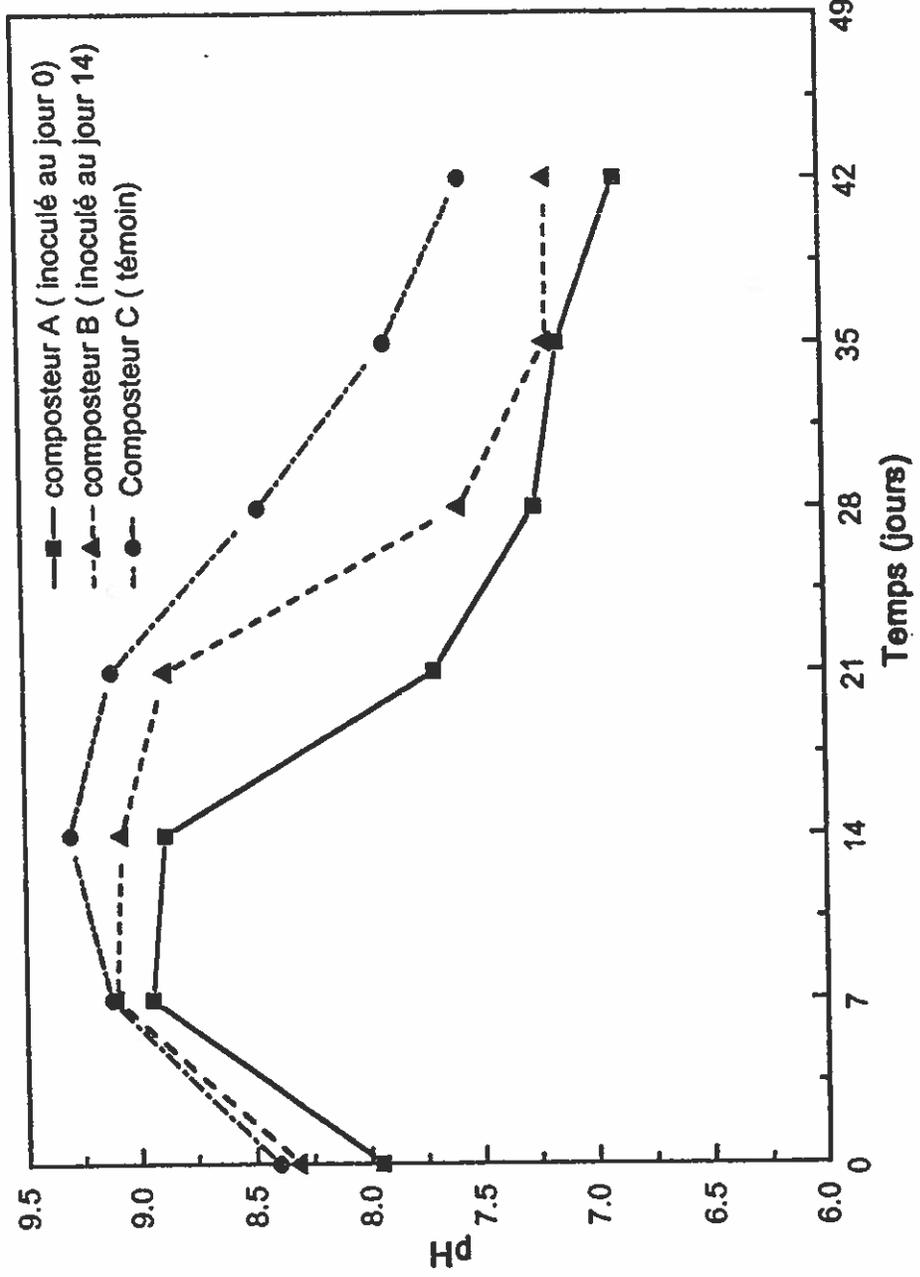


Figure 16 : Évolution du pH au cours du compostage (lots n° 3 et 4)

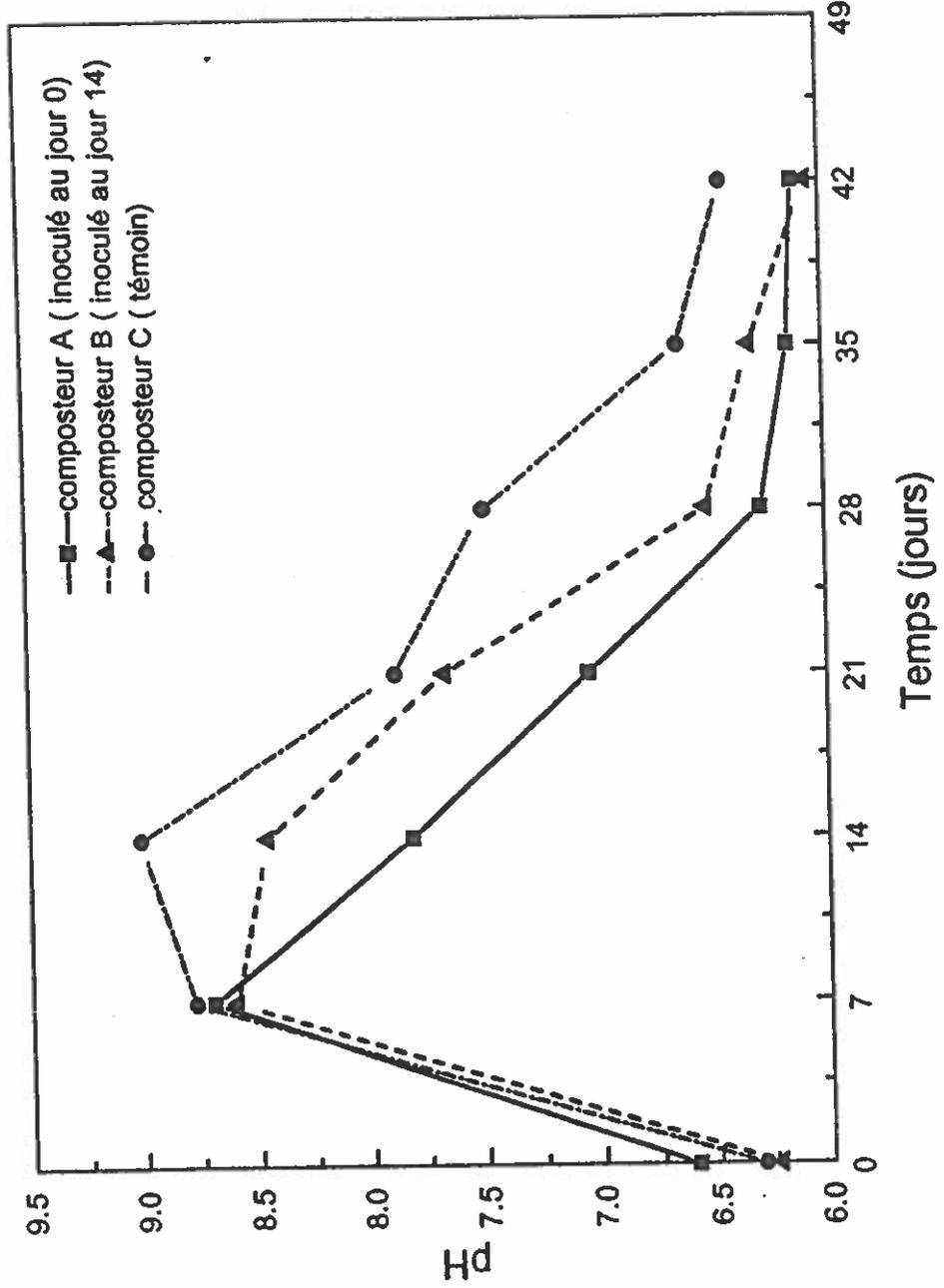


Figure 17 : Variation de la teneur en eau (lot n° 1).

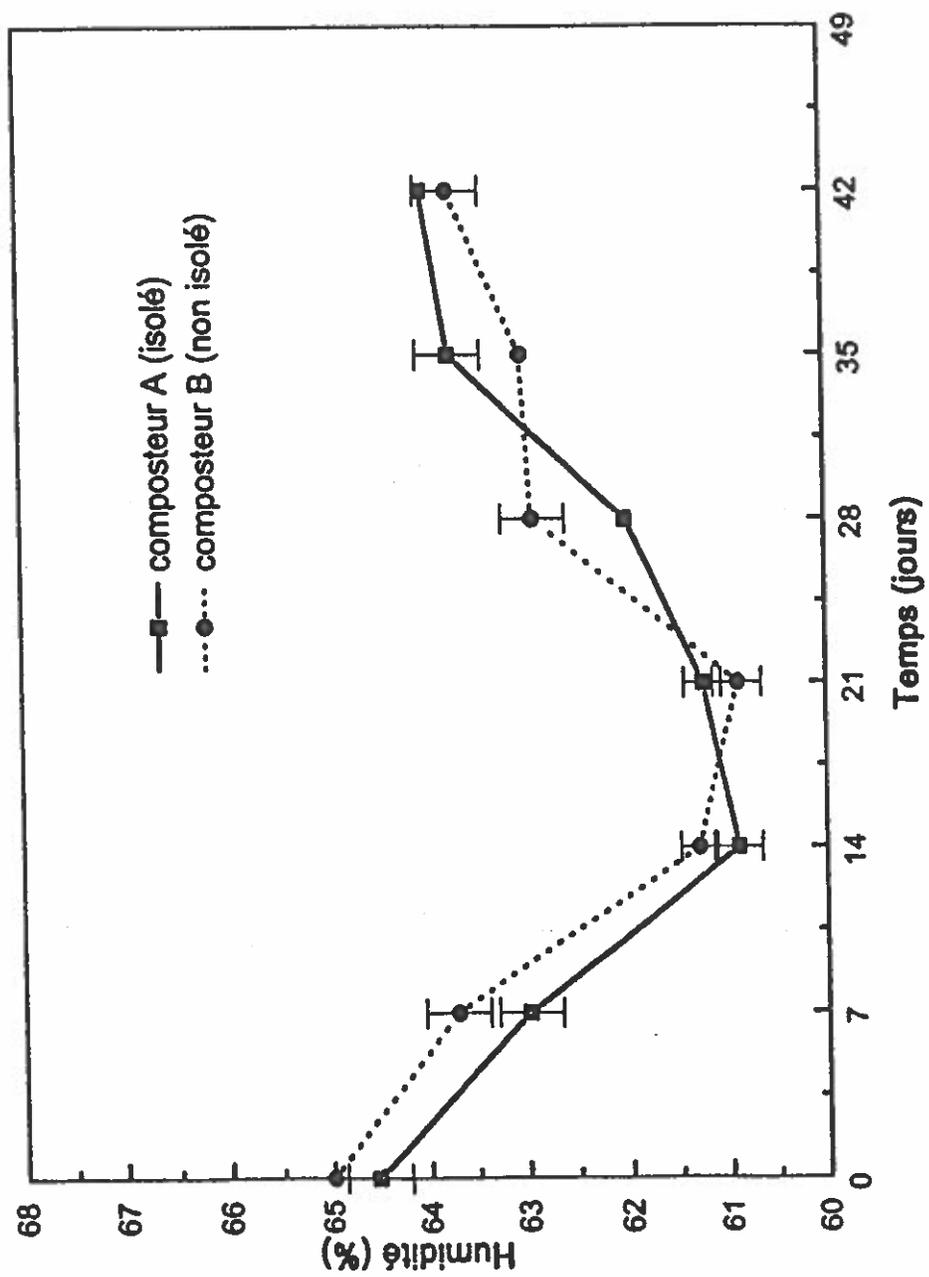


Figure 18 : Variation de la teneur en eau (lot n° 2).

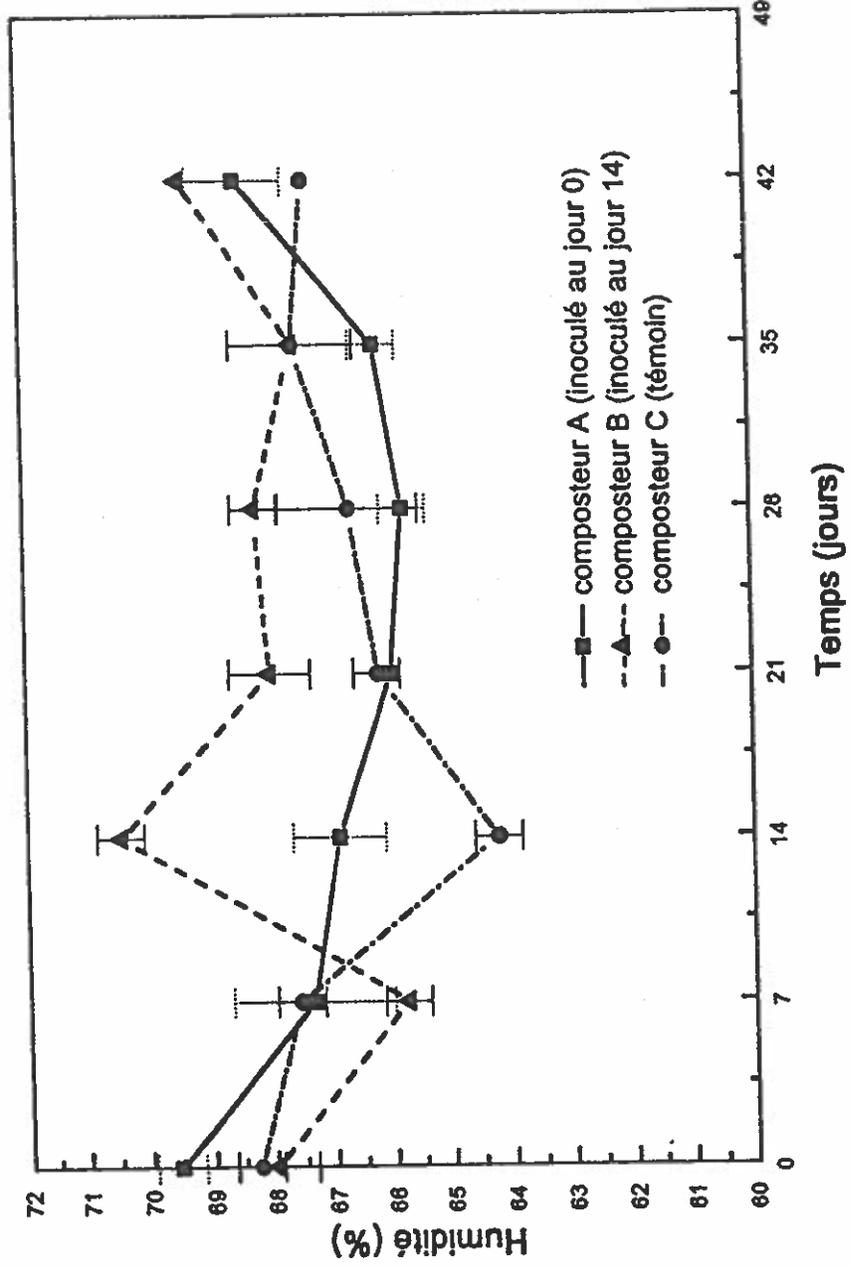


Figure 19 : Variation de la teneur en eau (lots n° 3 et 4)

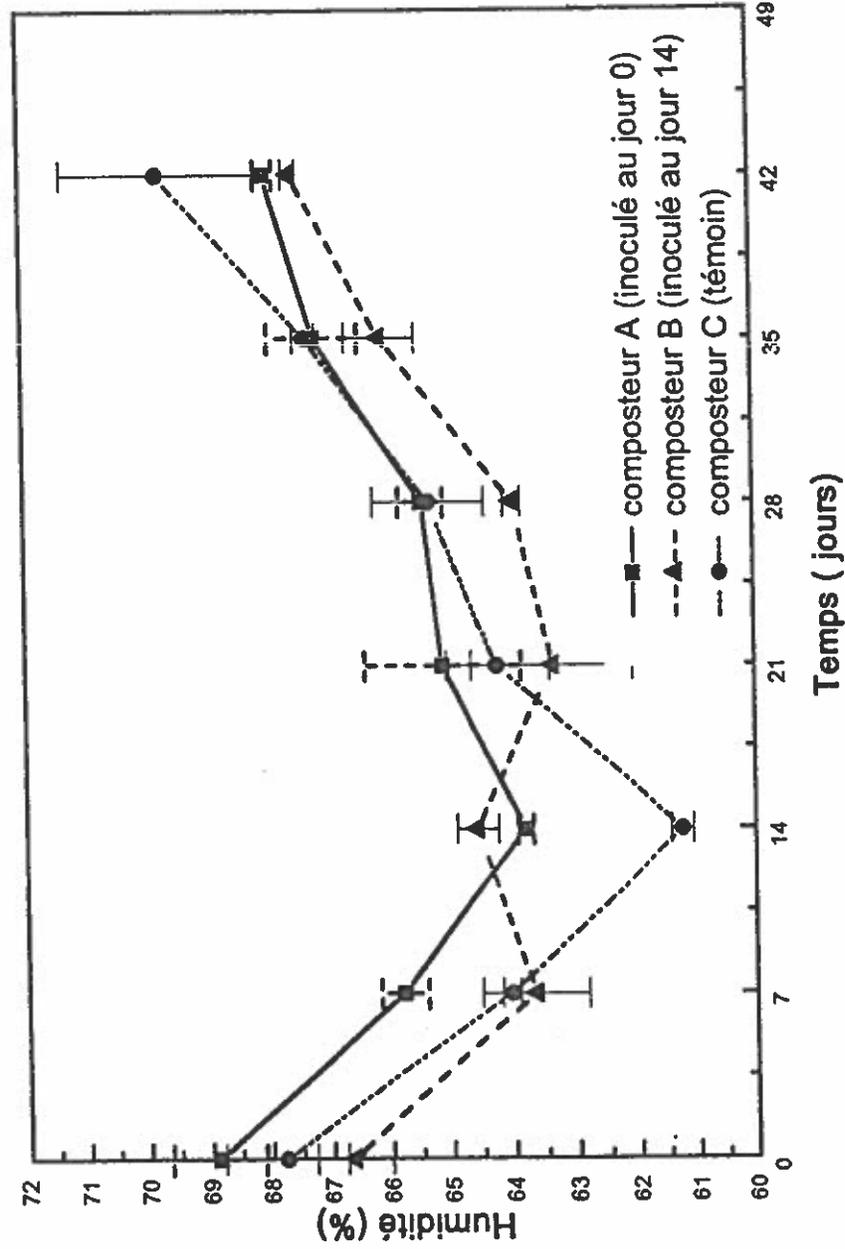


Figure 20 : Évolution de rapport C/N au cours du compostage (lot n° 1).

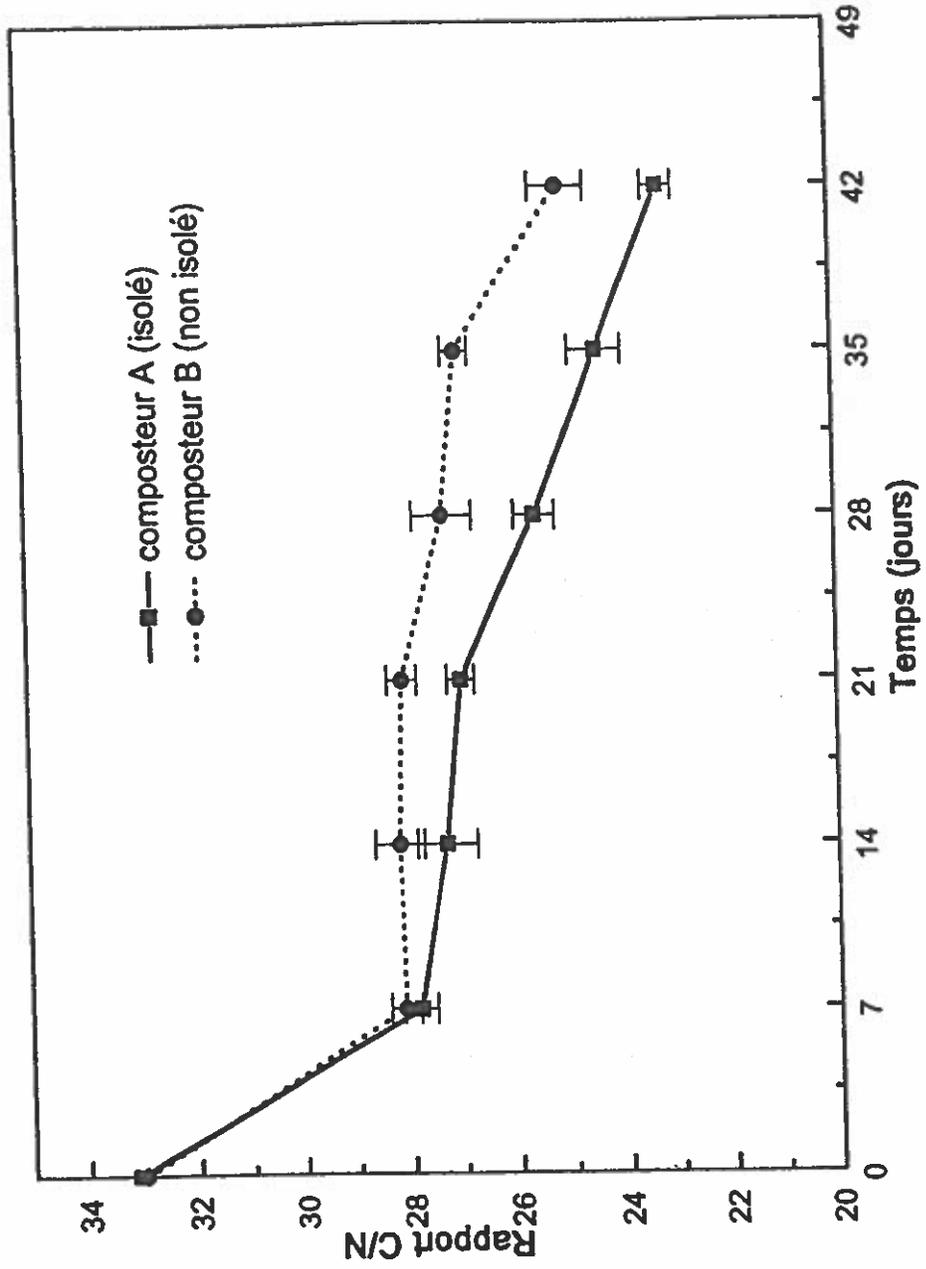


Figure 21 : Évolution de rapport C/N au cours du compostage (lot n° 2).

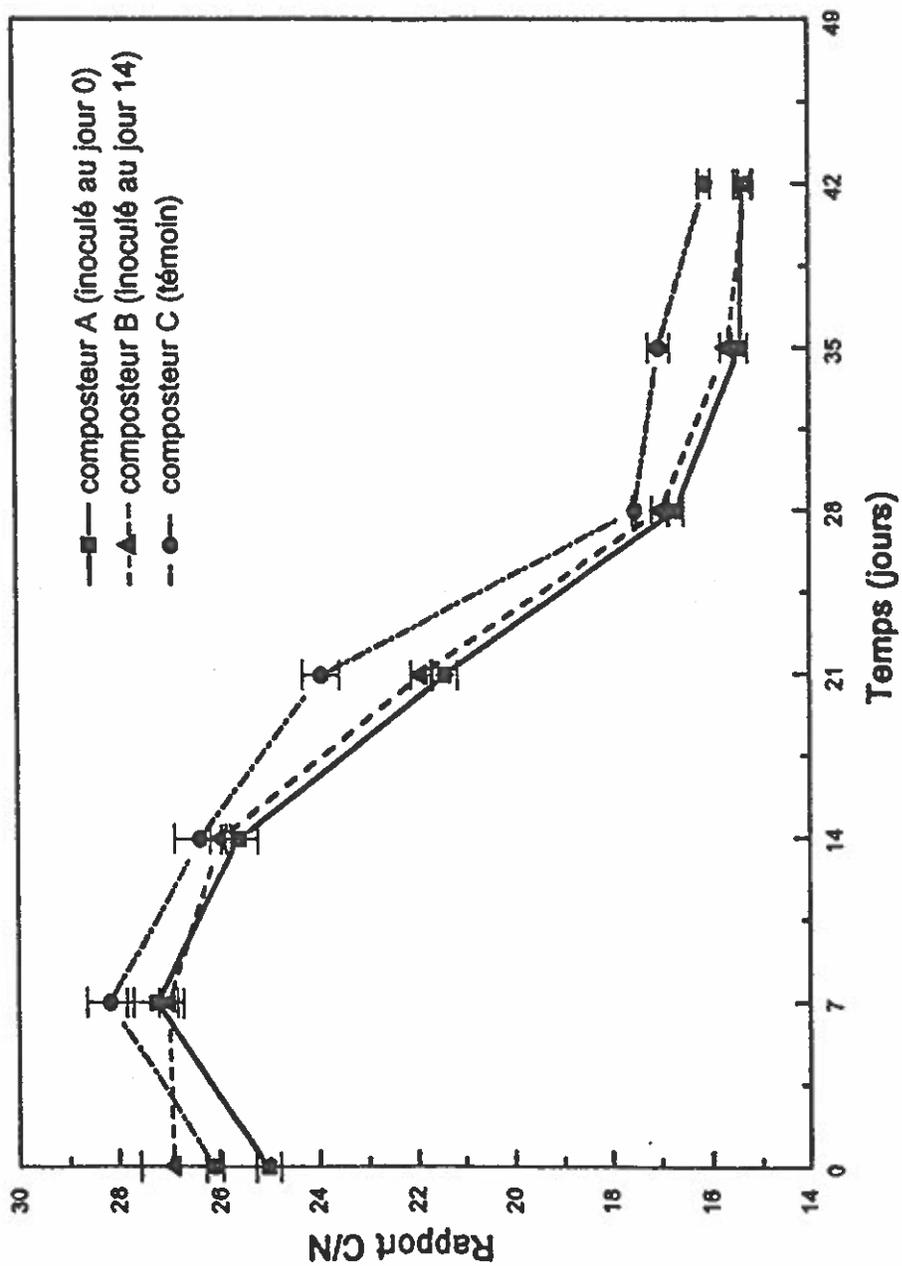
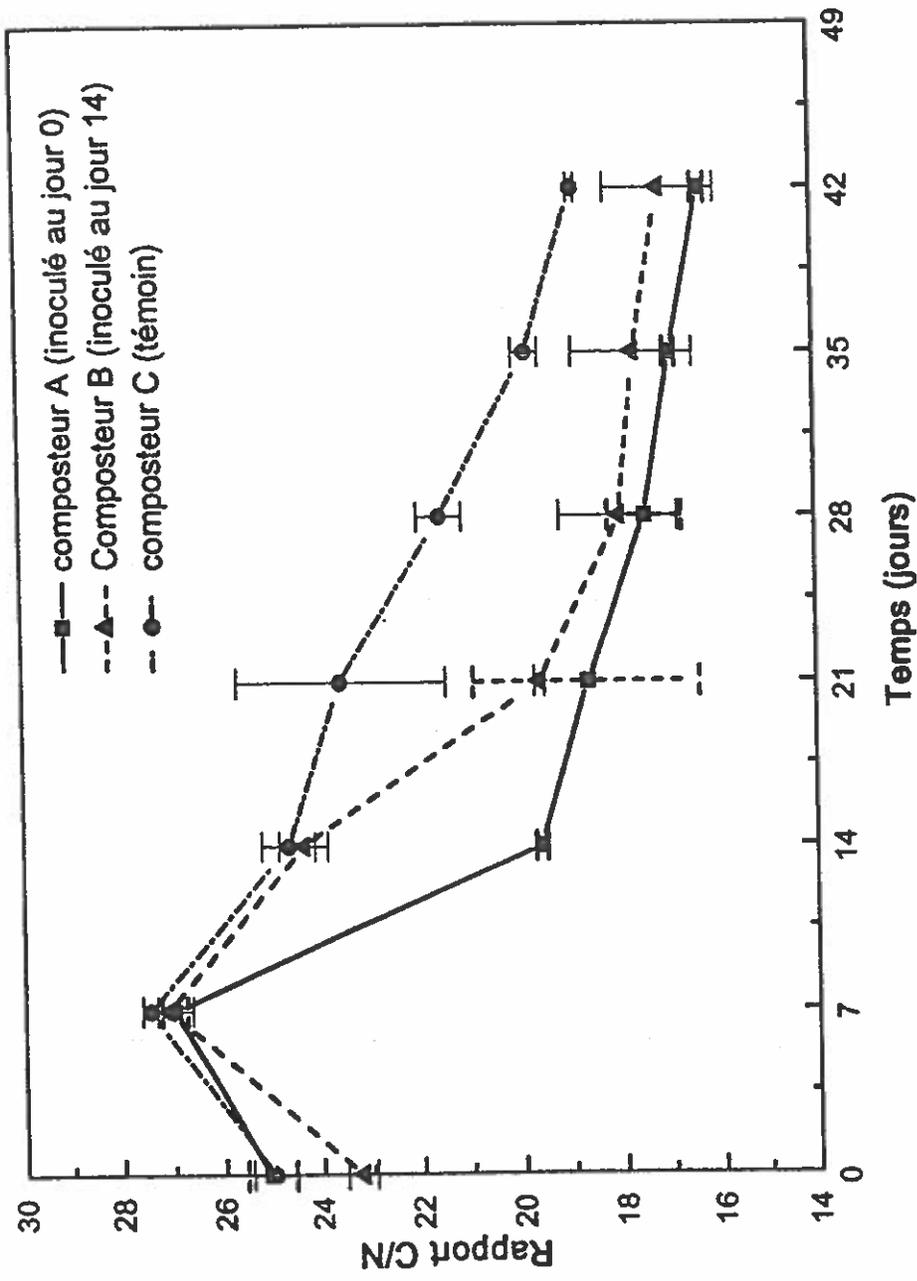


Figure 22 : Évolution de rapport C/N au cours du compostage (lots n° 3 et 4)



C/N dans chacun des composteurs. Le rapport C/N du lot n°1 (figure 21) révèle une diminution de celui-ci après 42 jours de compostage. Le rapport passe de 33 à respectivement 23 et 25 dans le composteur A et B, ce qui témoigne d'une dégradation du carbone. En outre dans les courbes des figures 22 et 23, on constate qu'après seulement quelques jours de compostage, le rapport C/N augmente considérablement pour former un pic au jour 7, dans les différents composteurs, pour les lots 2, 3 et 4.

Au début du 14^e jour de compostage le rapport C/N a tendance à diminuer progressivement . Au bout de 42 jours les rapports C/N finaux dans les composteurs A et B sont identiques et en moyenne égaux à 15, alors que dans le composteur C, il est de 16 (figure 22) et de 18 (figure 23).

2.5 Cellulose

Le pourcentage initial de cellulose dans les boues papetières est de 43% pour le lot 2 et en moyenne 30% pour les lots 3 et 4 (figure 24 et 25). Après 42 jours de compostage le lot 2 témoigne d'une diminution respective de 49%, 57% et 27% dans les composteurs A, B et C. En ce qui concerne les lots 2 et 3, la diminution moyenne est d'environ 51%, 52% et 24% respectivement dans les composteurs A, B et C.

Figure 23 : Dégradation de la cellulose au cours du compostage (lot n° 2).

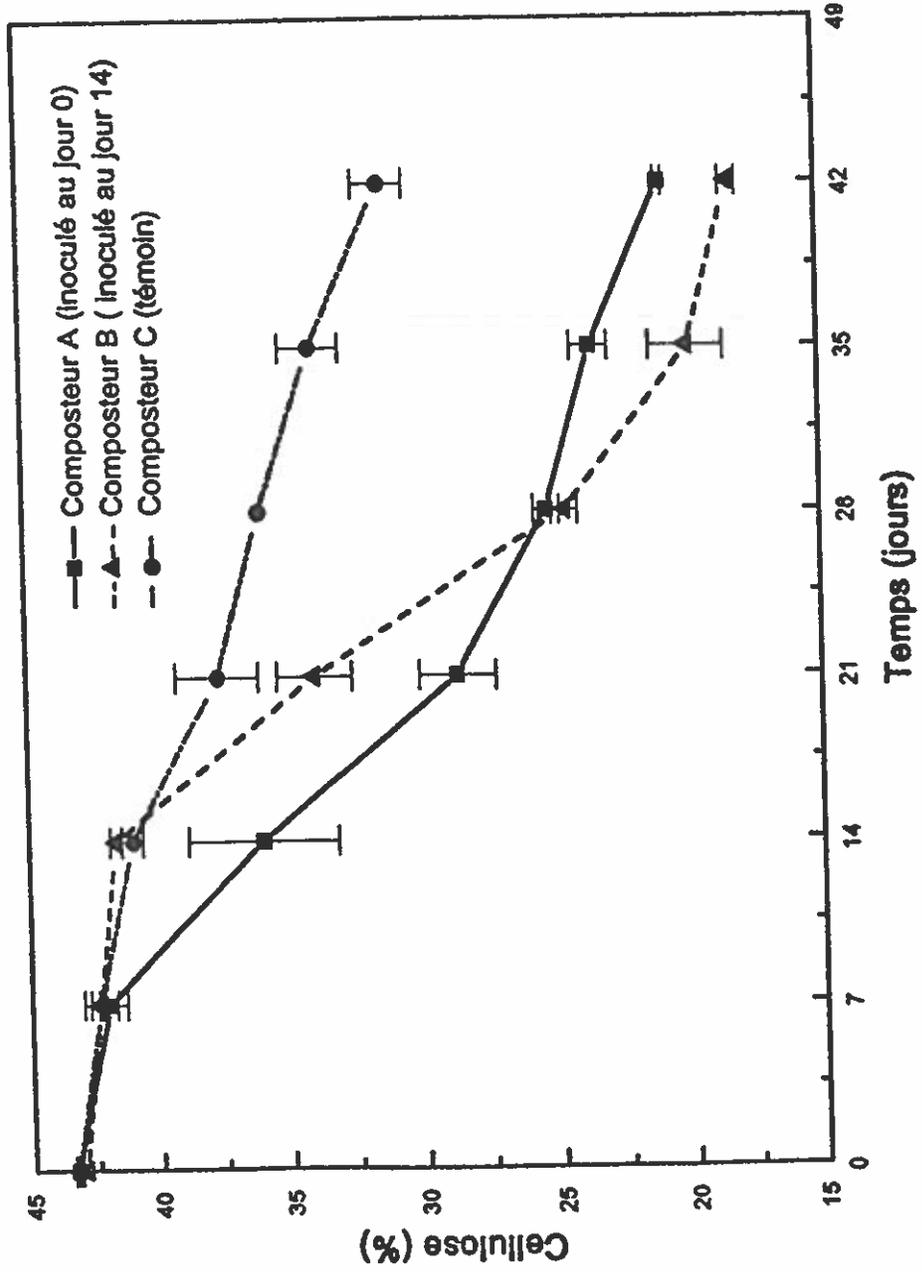
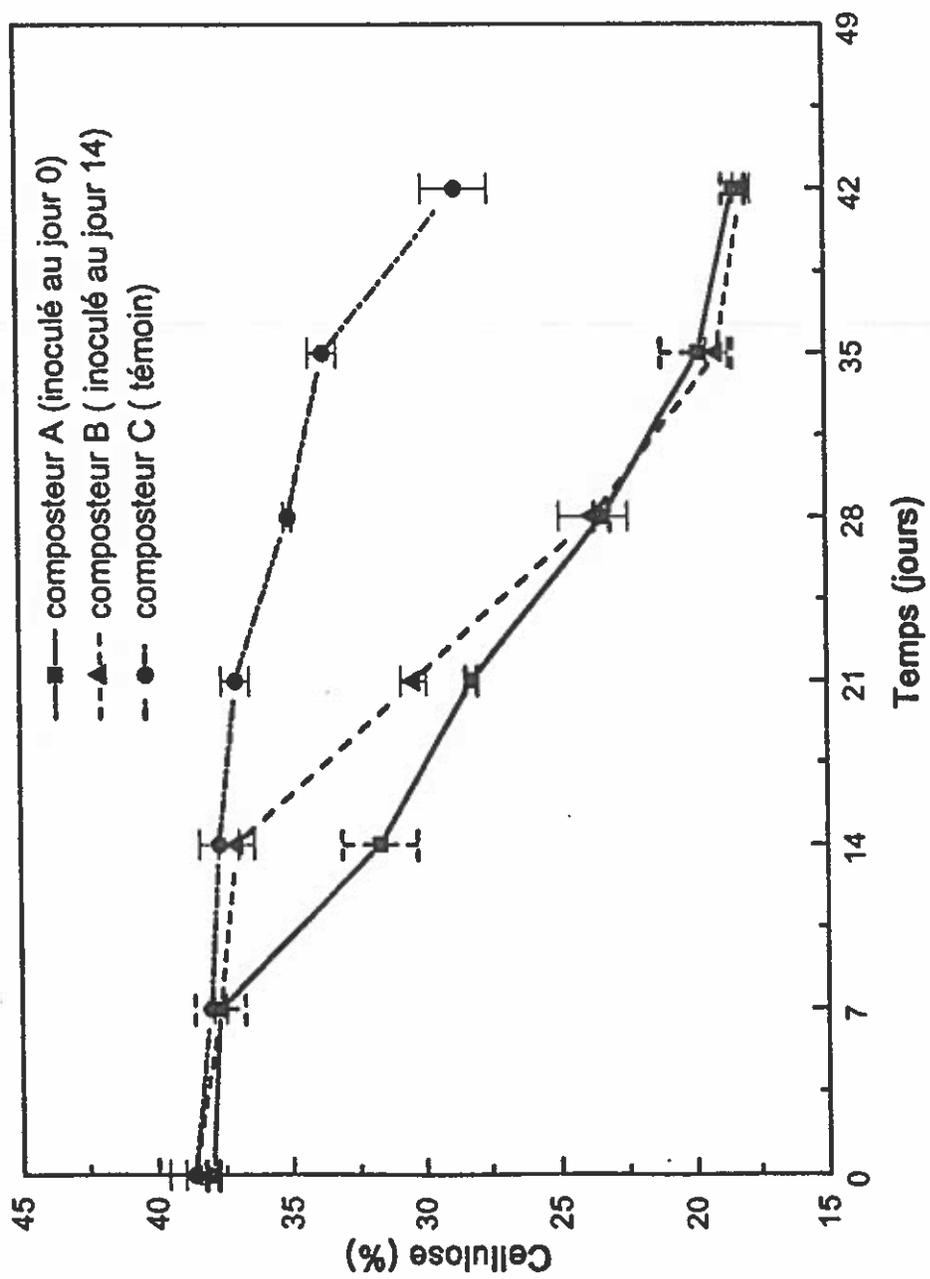


Figure 24 : Dégradation de la cellulose au cours du compostage (lots n° 3 et 4)



2.6 Demande chimique en oxygène

La stabilité du compost est confirmée par l'atteinte d'un seuil de DCO situé à 350mg/ g au cours du compostage. Les figures 25 et 26 montrent la diminution de la DCO observée dans chacun des composteurs. La baisse est notée au bout de 42 jours de compostage. Ainsi à la figure 25 on constate que la diminution de la DCO est plus rapide dans le composteur B, inoculé après la phase thermophile. Celle-ci est suivi du composteur A, puis du composteur C. La baisse est respectivement de l'ordre de 77%, 80%, et 72% dans les composteurs A, B, et C. La figure 26 montre la même tendance , à savoir une diminution plus rapide dans le cas du composteur B. Dans ce cas les diminutions sont respectivement de l'ordre de 74%, 80% et 70% dans les composteurs A, B et C.

3. Analyse statistique

Après analyse statistique, on constate qu'il n'y a pas de différence significative ($P < 0,0001$) entre les composteurs inoculé en début de processus et celui après la phase thermophile (tableau 12 et 14). Toutefois les résultats des deux inoculations donnent des résultats supérieurs au témoin. Cette différence est surtout observée au niveau des paramètres azote et cellulose de l'essai 3 et 4 (tableau 13 et 15), et uniquement au niveau de la dégradation de la cellulose de l'essai 2.

Figure 25 : Diminution de la D.C.O. au cours du compostage (lot n° 2).

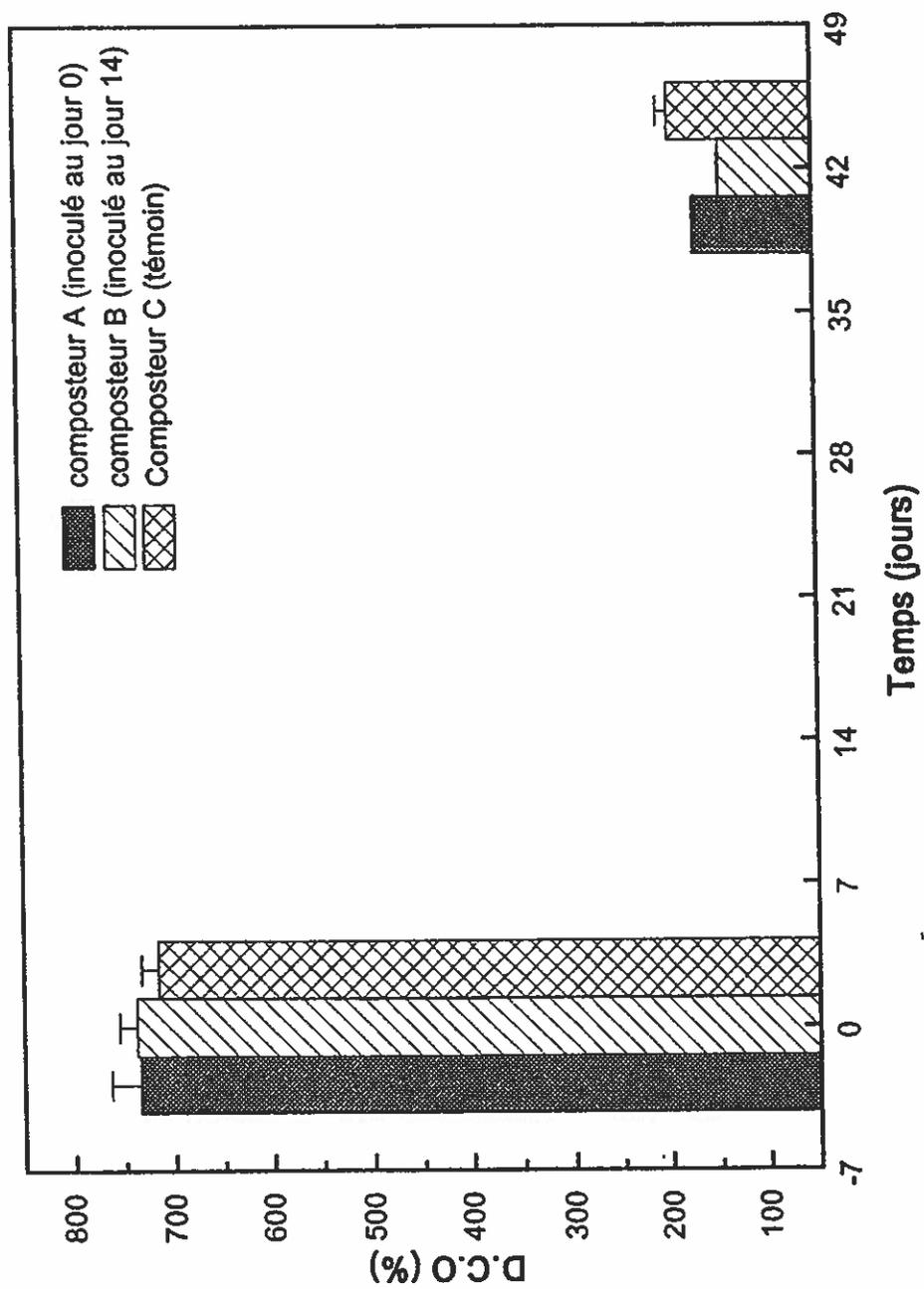


Figure 26 : Diminution de la D.C.O. au cours du compostage (lots n° 3 et 4)

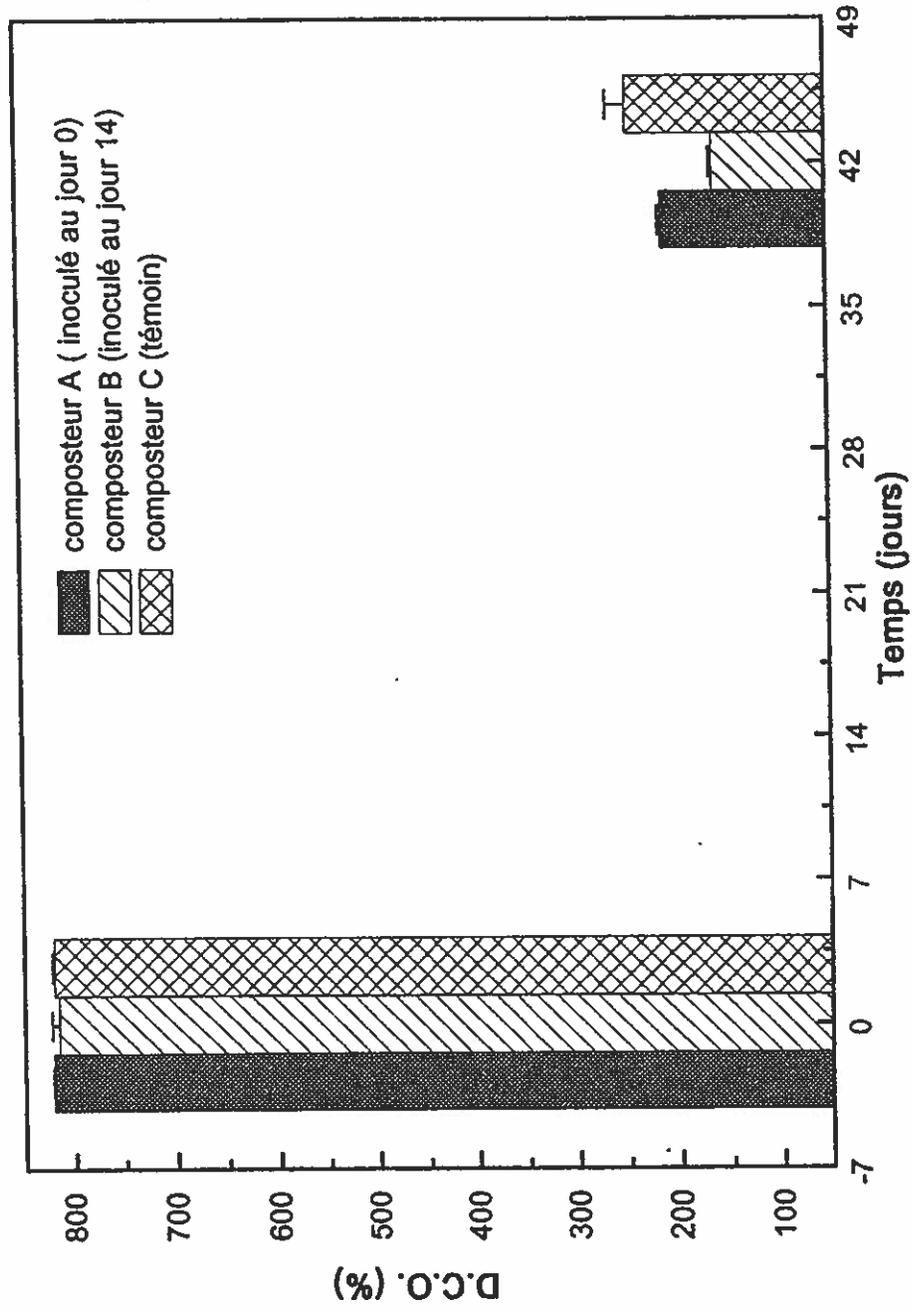


Tableau 12 : Augmentation de la valeur de chaque paramètre causée par les différentes conditions de compostage pour la durée entière de l'expérience.
(essai n° 2)

Paramètre (%)	Compost A vs B		Compost A vs C		Compost B vs C	
	β	valeur P ¹	β	valeur P	β	valeur P
Humidité	-1,14	0,01	0,35	0,43	1,49	0,001
Matière organique	0,65	0,35	-1,26	0,07	-1,90	0,008
Carbone	0,35	0,39	-0,73	0,07	-1,08	0,009
Azote	0,05	0,26	0,07	0,10	0,02	0,61
C/N	-0,43	0,44	-1,21	0,03	-0,78	0,16
Cellulose	-0,57	0,65	-6,52	<0,0001	-5,95	<0,0001

1 : Valeur de P provenant d'une analyse de régression multiple.

A : Composteur inoculé au début du processus du compostage.

B : Composteur inoculé après la phase thermophile.

C : Composteur témoin.

β : Pente

P : Probabilité

Tableau 13 : Augmentation moyenne de la valeur de chaque paramètre par unité de temps selon les différentes conditions de compostage.
(essai n° 2)

Paramètre (%)	Tous composteurs		Par composteur			Interaction significative ²
	β	valeur P ¹	Composteur	β	valeur P ¹	
Humidité	0,00	0,98	A	-0,034	0,13	AB
			B	0,036	0,11	
			C	-0,001	0,96	
Matière organique	-0,444	<0,0001	A	-0,465	<0,0001	-
			B	-0,460	<0,0001	
			C	-0,408	<0,0001	
Carbone	-0,257	<0,0001	A	-0,270	<0,0001	-
			B	-0,266	<0,0001	
			C	-0,237	<0,0001	
Azote	0,17	<0,0001	A	0,17	<0,0001	-
			B	0,18	<0,0001	
			C	0,16	<0,0001	
C/N	-0,323	<0,0001	A	-0,315	<0,0001	-
			B	-0,341	<0,0001	
			C	-0,313	<0,0001	
Cellulose	-0,523	<0,0001	A	-0,583	<0,0001	AC BC
			B	-0,692	<0,0001	
			C	-0,294	<0,0001	

1 : Valeur de P provenant d'une analyse de régression multiple.

2 : Interaction significative entre le facteur jour et le facteur défini par la paire de composteurs spécifiée. Lorsqu'il y a interaction entre le facteur composteur et le facteur jour, il est impossible d'analyser l'effet produit uniquement par le facteur composteur étant donné que les facteurs composteur et jour n'agissent pas indépendamment l'un de l'autre sur le paramètre étudié.

A : Composteur inoculé au début du processus du compostage.

B : Composteur inoculé après la phase thermophile.

C : Composteur témoin.

β : Pente

P : Probabilité

Tableau 14 : Augmentation de la valeur de chaque paramètre causée par les différentes conditions de compostage pour la durée entière de l'expérience.
(essai n° 3 et 4)

Paramètre (%)	Compost A vs B		Compost A vs C		Compost B vs C	
	β	valeur P ¹	β	valeur P	β	valeur P
Humidité	1,35	0,004	1,02	0,03	-0,33	0,47
Matière organique	0,74	0,15	0,47	0,35	-1,21	0,02
Carbone	0,18	0,54	-0,55	0,06	-0,72	0,01
Azote	0,15	<0,001	0,34	<0,0001	0,19	<0,0001
C/N	-1,02	0,03	-3,09	<0,0001	-2,07	<0,0001
Cellulose	-1,00	0,20	-6,95	<0,0001	-5,95	<0,0001

1 : Valeur de P provenant d'une analyse de régression multiple.

A : Composteur inoculé au début du processus du compostage.

B : Composteur inoculé après la phase thermophile.

C : Composteur témoin.

β : Pente

P : Probabilité

Tableau 15 : Augmentation moyenne de la valeur de chaque paramètre par unité de temps selon les différentes conditions de compostage.
(essai n° 3 et 4)

Paramètre (%)	Tous composteurs		Par composteur			Interaction significative ²
	β	valeur P ¹	Composteur	β	valeur P ¹	
Humidité	0,042	0,02	A	0,005	0,81	AC
			B	0,031	0,08	
			C	-0,091	0,002	
Matière organique	-0,433	<0,0001	A	-0,425	<0,0001	-
			B	-0,463	<0,0001	
			C	-0,412	<0,0001	
Carbone	-0,248	<0,0001	A	-0,237	<0,0001	-
			B	-0,268	<0,0001	
			C	-0,240	<0,0001	
Azote	0,11	<0,0001	A	0,14	<0,0001	AC BC
			B	0,13	<0,0001	
			C	0,006	<0,0001	
C/N	-0,207	<0,0001	A	-0,220	<0,0001	-
			B	-0,225	<0,0001	
			C	-0,177	<0,0001	
Cellulose	-0,436	<0,0001	A	-0,517	<0,0001	AC BC
			B	-0,561	<0,0001	
			C	-0,229	<0,0001	

1 : Valeur de P provenant d'une analyse de régression multiple.

2 : Interaction significative entre le facteur jour et le facteur défini par la paire de composteurs spécifiée. Lorsqu'il y a interaction entre le facteur composteur et le facteur jour, il est impossible d'analyser l'effet produit uniquement par le facteur composteur étant donné que les facteurs composteur et jour n'agissent pas indépendamment l'un de l'autre sur le paramètre étudié.

A : Composteur inoculé au début du processus du compostage.

B : Composteur inoculé après la phase thermophile.

C : Composteur témoin.

β : Pente

P : Probabilité

DISCUSSION

1. Analyse microbiologique

1.1 Choix du consortium

Avant de procéder à la sélection d'un consortium microbien, nous nous sommes d'abord intéressé au choix du composteur. Le composteur de type *Enviro-Cycle* a été sélectionné pour sa facilité de brassage et de retournement de la matière, et également pour sa base qui permet de récupérer le lixiviat. Pour le choix du consortium, notre intérêt s'est arrêté sur des microorganismes dont l'activité lignocellulolytique est connue. Il s'agit du mélange bactérien non identifié (ATCC 31205) et du champignon *Pleurotus ostreatus* (ATCC 58052). Ces derniers ont largement été étudiés, et leur capacité à dégrader des substrats lignocellulosiques a été prouvée par les auteurs cités plus haut (chapitre 3.1.1 de la partie Matériel et Méthodes). De plus la sélection des souches isolées à partir des boues papetières primaires et secondaires a été effectuée en fonction de leur importance et de leur température optimales de croissance. Les actinomycètes ont été sélectionnées à cause de l'importance de leur rôle dans la décomposition de la cellulose et de la lignine (Alexander, 1977). Les bactéries Gram - ont été retenues parcequ'elles se retrouvent uniquement dans la phase active de décomposition, soit la première phase mésophile du compostage. Pour les deux autres bactéries Gram +, le choix a été basé sur le fait qu'elles soient résistantes et subsistent dans les phases finales du compostage. Selon Mustin (1987), "lors du compostage, il est certain qu'il se produit, à partir de l'environnement microbiologique une sorte d'autosélection dans la masse des espèces les mieux adaptées à la nature et au type

d'évolution du compost; a priori, il y a des chances pour que les microorganismes les mieux armés dans cette compétition soient aussi les plus actifs. Ces microorganismes subsistent sans doute dans les phases finales de compostage et leur réensemencement massif (1 à 10% et plus de la masse à composter) les amènent à se développer plus rapidement”.

Ainsi notre consortium qui a servi d'inoculum est composé d'actinomycètes, de champignons et de bactéries. Certaines de ces souches se développent à des températures mésophiles et d'autres thermophiles. Ceci nous assure une activité microbienne pour les deux phases mésophiles autant que pour la phase thermophile lors du compostage.

1.2 Numération des microorganismes durant le compostage

Le milieu thermique sélectionne les populations de microorganismes qui ont un équipement enzymatique propre à s'adapter à la température du substrat (Mustin, 1987). L'observation de l'évolution des UFC /g lors du compostage (figures 7 a, b , c et 8 a, b, c) révèlent qu'au début du processus, les bactéries mésophiles prédominent, puis cèdent rapidement (jour 7) la place aux bactéries thermophiles qui envahissent toute la masse. Ces observations sont en accord avec les travaux de Campbell et al., (1991), sur la nature des microorganismes intervenant dans la décomposition de la matière organique lors du compostage. D'après Allison (1973), ce sont des bactéries sporulantes à croissance rapide qui composeraient la microflore de départ. La présence de bactéries en début de processus

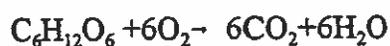
s'explique par le fait qu'elles peuvent croître dans un milieu à humidité élevée et sur une large gamme de pH. Selon Poincelot (1974) les bactéries mésophiles utilisent les sucres et l'amidon, alors que les thermophiles dégradent les lipides, les protéines et autres matériel facile à briser. Certaines bactéries thermophiles peuvent également jouer un rôle majeur dans la décomposition de la cellulose. Dans le même ordre d'idée Campbell et al (1991), dans leur travaux sur le compostage des boues papetières avancent qu'au début du processus de compostage, de la chaleur est générée par des bactéries qui métabolisent des composés de faible poids moléculaire.

En ce qui concerne les actinomycètes, ils sont présents à partir de la première phase mésophile jusqu'à la seconde phase mésophile. Ils tolèrent aussi bien des pH neutres qu'alcalins. Toutefois le pH 5 est vraiment limitant pour leur croissance (Fortin et al, 1982). Les actinomycètes mésophiles sont présents (mais moins important que les bactéries) au début du compostage. Quant aux actinomycètes thermophiles, ils apparaissent généralement au bout de 7 jours. De Bertoldi et al., (1985), dans leur travaux sur le compostage, mentionnent l'importance des actinomycètes et affirment qu'on les retrouve durant la phase thermophile et deviennent abondant dans le dernier stade de décomposition. Ils interviennent surtout dans la décomposition de la cellulose et des composés ligneux. Selon De Bertoldi et al., 1983, "L'activité métabolique des actinomycètes est fondamentale à l'humification de la matière organique et à la production de composés aromatiques (i.e. geosmine)".

Les champignons mésophiles ainsi que les thermophiles sont absents au début du processus. Même dans le composteur A malgré qu'il y ait eu inoculation le nombre de champignons n'est pas assez important pour être pris en considération. Dans tous les cas, ils prennent de l'importance au cours des dernières phases du compostage. Selon Campbell et al., (1991), les champignons deviennent importants durant la seconde phase mésophile pour attaquer des composés complexes comme la cellulose et l'hémicellulose. Le pH optimum pour la croissance des champignons se situe aux alentours de 7, mais ils tolèrent mieux l'acidité que les bactéries et les actinomycètes. Si les champignons sont dominants aux pH bas, c'est donc par manque de compétition des autres organismes; et c'est ce qui explique leur abondance après refroidissement de la matière organique au cours des différents essais de compostage.

1.3 Numération de la flore cellulolytique durant le compostage

La présence de flore cellulolytique en petit nombre au début du processus de compostage, est attribuable aux transformations chimiques que subit la matière organique et qui fait intervenir une flore spécifique pour chaque type de dégradation. En effet au début du compostage la décomposition est initiée par des microorganismes qui ne sont pas nécessairement cellulolytique, puisqu'ils dégradent uniquement des hydrates de carbone simples tels que le glucose selon l'équation suivante:



Une fois cette dégradation achevée, les cellulolytiques rentrent en jeu afin de dégrader des composés ayant des structures plus résistantes et plus complexes, comme la cellulose. L'évolution de la flore cellulolytique (figures 9 et 10) va de paire avec l'activité cellulolytique (figures 23 et 24), on constate qu'un pic de dégradation de cellulose est toujours précédé d'un pic du nombre d'organismes cellulolytiques.

Cependant, en ce qui concerne le composteur A, inoculé au début du processus, le nombre de microorganismes cellulolytiques détecté est non significatif. Malgré qu'il y ait eu inoculation on peut considérer que la flore cellulolytique n'est pas présente au début puisque le nombre des UFC n'est pas assez important pour être pris en considération. Ceci peut être attribuable soit à la faible population de l'inoculum, ou à une compétition entre la flore indigène du substrat et l'inoculum lui même.

2. Analyse physico-chimique

2.1 Température - oxygène

La température est un élément clé pour suivre l'évolution de la décomposition de la matière organique à cause du phénomène cité plus haut (chapitre 1.2). C'est un facteur important surtout dans le compostage aérobi.

Les courbes des graphiques de température montrent que ce paramètre progresse à travers les phases typiques du compostage, à savoir phases mésophile, thermophile et mésophile seconde. Les résultats de l'essai n°1 rendent compte de l'efficacité d'avoir isoler

les composteurs avec de l'Astrofoil. En effet dans le composteur isolé, on constate d'une part que la température monte plus rapidement et d'autre part la phase thermophile dure plus longtemps (7 jours vs 5 jours) par rapport au composteur non isolé. L'isolation du composteur a eu pour effet de fournir une température et un milieu favorable au développement d'une flore thermophile importante et capable de dégrader des composés de hauts poids moléculaires. Il en résulte que tous les composteurs lors des essais sont isolés. Lors des essais de compostage avec inoculation, l'obtention des températures optimales sont atteintes plus rapidement dans le cas du composteur inoculé en début de processus. Dans ce cas aussi la phase thermophile dure plus longtemps. L'activité des microorganismes est à l'origine de la montée en température lors du compostage. Ces derniers produisent de la chaleur en oxydant la matière organique des substrats. Dans le cas du composteur inoculé en début du processus, le maintien de la phase thermophile sur une période plus longue, s'explique par le fait que le consortium microbien ayant servi à l'inoculation est constitué de souches se développant à des températures thermophiles soit à 55° C. À remarquer que les souches d'actinomycètes qui composent le consortium microbien se développent aussi bien à des températures mésophiles que thermophiles.

Dans les trois composteurs la baisse finale de la température est moins brusque que son augmentation initiale, ce qui indique une bonne stabilisation selon Gotaas (1959). Toutefois la remontée en température observée dans les composteurs inoculés, soit A et B, est due au consortium, puisque ce phénomène n'est pas constaté dans le composteur témoin (C) lors

des différents essais de compostage. Selon Mustin (1987), les bactéries qui sporulent aux températures élevées (vers 65° C) quittent leur forme végétative d'activité pour "passer au mieux" la vague de chaleur en vie ralentie, et reprendre leur activité dès que la température sera descendue en dessous du seuil. Il faut noter que toutes les bactéries isolées à partir des boues papetières et qui composent le consortium microbien servant à l'inoculation, sporulent.

En ce qui concerne l'oxygène, on constate que les courbes sont inversement proportionnelles à celles des températures (le pourcentage d'oxygène décroît avec la montée de la température et augmente à mesure que celle-ci diminue).

La flore microbienne aérobie consomme de l'oxygène pour oxyder les composés organiques qui lui servent de nourriture. Les besoins évoluent au cours de la dégradation de la matière organique. Ainsi la raréfaction de l'oxygène au début du processus de compostage, correspond à la phase où les besoins en oxygène sont forts, car à ce stade l'activité de dégradation par les microorganismes décomposeurs est maximale. Durant la seconde phase l'activité de dégradation est moyenne et par conséquent les besoins en oxygène le sont également. La troisième phase correspond au stade de maturation où la dégradation est lente, d'où des besoins en oxygène faible. La mesure du pourcentage en oxygène à l'intérieur des composteurs nous a permis d'établir les fréquences d'aération et de retournement de la matière en vue d'apporter l'oxygène nécessaire au métabolisme des

microorganismes. Le retournement permet également une meilleure distribution de la biomasse à travers la matière.

2.2 Le pH

Selon Seekins (1986), le pH des boues papetières varie de 5,8 à 8,9 selon les usines, ce qui ne demande aucun correctif pour leur emploi dans la fabrication de compost. Malgré que le pH initial des boues papetières (primaires et secondaires) provenant des divers lots, n'est pas le même (varie de 6,3 à 8,4) lors des divers essais de compostage, il a d'abord tendance à augmenter à mesure que la température augmente pour atteindre des valeurs alcalines. L'alcalinisation est le résultat, soit d'une production ammoniacale à partir de la dégradation des amines (Mustin, 1987; Poincelot, 1974), selon l'équation:

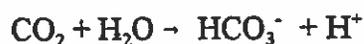


soit de la libération des bases auparavant intégrées à la matière organique (Mustin, 1987).

À mesure que le processus de compostage se dirige vers la phase finale de décomposition, le pH a tendance à diminuer à cause des acides organiques que produisent les bactéries à partir des glucides et lipides (Golueke, 1972 ; Safwat, 1981) selon l'équation

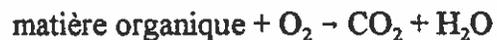


De plus selon Mustin (1987) la diminution du pH vers les valeurs acides peut être due à la production de CO_2 qui se dissout dans l'eau lors de la dégradation aérobie.



2-3 Humidité

Les boues papetières issues des différents lots reçus ne nécessitent aucun correctif pour leur emploi dans les essais de compostage puisque leurs teneurs sont comprises dans l'intervalle suggéré dans la littérature traitant du compostage. À ce titre Campbell et al., (1991), recommandent des valeurs comprises entre 40% et 70% dans le cas de boues papetières. Durant les 42 jours de compostage, la teneur en eau varie pour deux raisons : durant la période de dégradation chaude, celle-ci diminue sous l'action conjuguée de la montée de la température et de l'aération périodique qui entraînent des pertes d'eau sous forme de vapeur d'eau. Une fois la phase thermophile passée, la teneur en eau a tendance à augmenter. Cette augmentation est due à la production d'eau par les microorganismes qui dégradent les matières organiques en présence d'oxygène suivant la réaction globale :



Cette eau issue du métabolisme des microorganismes est appelée eau métabolique pour la distinguer de l'eau présente dans les substances au début du compostage (Mustin, 1987).

2.4 Rapport C/N

Seul le rapport C/N du lot no. 1 n'augmente pas au cours du compostage. Celui-ci comme spécifié dans la littérature, décroît constamment au cours des 42 jours d'essais. À l'opposé dans les essais 2, 3 et 4, le rapport C/N a tendance à augmenter durant les

premiers jours de compostage. Cette augmentation est due aux pertes relativement importantes d'azote et de la faible diminution du carbone.

Ces pertes non négligeables d'azote se produisent entre 0 et 7 jours : l'odeur d'ammoniac est sentie autour des composteurs dans la pièce où se sont déroulés les essais de compostage. La perte d'azote est sans doute due à l'augmentation du pH durant la phase thermophile. À ce sujet Golueke (1972) rappelle que les pH élevés encouragent la formation d'ammoniac et par conséquent les pertes d'azotes. Il en est de même pour De Bertoldi et al., (1981) qui rapportent dans leurs travaux sur le compostage des boues des eaux usées que lors de la phase thermophile le pH augmente, et une perte d'ammoniac par volatilisation prend place.

Toutefois on peut prétendre que la perte d'azote survenue au cours des essais 2, 3 et 4 est probablement due au rapport C/N lui même, qui est trop bas. Or tous les auteurs ayant publié des travaux sur le compostage en général sont unanimes à dire que le rapport C/N joue un rôle capital dans la libération de NH_3 . En effet, plus la quantité d'azote est importante par rapport à la portion de carbone, plus le rapport C/N sera faible et plus le rendement d'ammonification sera élevé. L'explication semble en être la suivante: selon Langlois (1969), le fait d'avoir un rapport C/N élevé ne ralentit pas l'attaque des protéines et n'abaisse pas la formation d'ammoniac, les hydrates de carbone en abondance vont fournir de l'énergie en grande quantité pour accroître la population microbienne et la stimuler. Cette population nombreuse et active utilisera vite le NH_3 produit pour en faire la

synthèse de leur protoplasme, alors que si le matériel ne comporte que peu d'hydrates de carbone par rapport à l'azote, c'est à dire si le rapport C/N est faible, la population microbienne manquera d'énergie et laissera échapper l'ammoniac au lieu de l'utiliser pour la synthèse protoplasmique. Une fois la phase thermophile dépassée il n'y a plus de perte d'azote, la quantité est ramenée à un niveau plus satisfaisant, le rapport C/N décroît constamment, ce qui témoigne du bon déroulement du processus de compostage. Le rapport C/N final est toujours plus bas dans les composteurs inoculés par rapport au témoin.

2.5 Cellulose

La différence dans le pourcentage initial de la cellulose dans les boues papetières réside dans le fait que le lot no. 2 contient plus de boues primaires par rapport aux lots 3 et 4. Or le pourcentage de cellulose est plus élevé dans les boues primaires que secondaires. À travers les courbes(figures 23 et 24), on constate que la dégradation de la cellulose est quasiment nulle du jour 0 au jour 14 dans les trois composteurs. Après 14 jours de compostage, la dégradation est initiée dans le composteur A où l'inoculation a été effectuée au jour 0. Après le jour 14, on constate que la dégradation de la cellulose dans le composteur B, inoculé après la phase thermophile est beaucoup plus rapide que dans le composteur A et C. Les composteurs inoculés ont une meilleure dégradation de la cellulose par rapport au compost non inoculé où la dégradation est plus au moins constante. De plus

le début de la dégradation de la cellulose coïncide bien avec l'apparition de la flore cellulolytique observée au niveau des courbes des figures 9 et 10.

2.6 Demande chimique en oxygène

L'évaluation du degré de stabilisation d'un compost peut être appréciée à partir de différents tests. Dans notre cas la caractérisation de l'avancement du compost vers la maturation par le dosage de la DCO nous est apparue la méthode répondant le mieux à notre objectif. Ainsi l'observation des histogrammes de la DCO rendent compte de la diminution notable de celle-ci après 42 jours de compostage. Toutefois la diminution est plus marquée dans le cas du composteur inoculé après la phase thermophile, qui est suivie du composteur inoculé au début du processus. Dans tous les cas la DCO est plus bas dans les composteurs inoculés par rapport au témoin.

La bibliographie concernant le compostage de boues papetières consultée à date ne mentionne pas de chiffres concernant la DCO d'un compost stable. Dans le cadre d'études réalisées pour la plupart sur des résidus urbains, Mustin (1987), avance que " la maturité est jugée correcte pour des DCO inférieure à 350 mg/g de compost".

Tenant compte de cette donnée nos trois composts présentent des chiffres inférieurs à 350 mg/g de compost après seulement 42 jours de compostage.

CONCLUSION

Les objectifs de cette recherche étaient de montrer la faisabilité de composter des boues papetières secondaires et d'optimiser la vitesse de dégradation par inoculation avec un consortium microbien.

Compte tenu des caractéristiques chimiques des boues papetières secondaires (contenu élevé en azote, phosphore et matière organique), elles constituent un matériau de choix pour la pratique du compostage à condition que celles-ci soient mélangées avec un autre type de substrat afin de réduire le contenu élevé en eau et d'augmenter le rapport C/N initialement trop bas. Les boues papetières primaires semblent être un excellent co-substrat. Dans notre étude plusieurs mélanges de boues primaires et secondaires ont été testées. Il ressort de nos analyses que le lot n° 1 composé de 80% de boues primaires et 20% de boues secondaires soit le plus intéressant pour la pratique du compostage, puisque ce lot témoigne d'une faible perte d'azote au cours des premiers jours de compostage par rapport aux lots n°2 et 3. En effet aucune odeur d'ammoniac n'a été détectée autour des composteurs lors de la première semaine, de plus les résultats de l'azote ont montré une perte quasiment nulle, ce qui a entraîné une diminution du rapport C/N au cours du compostage en fonction du temps.

Le compostage des boues papetières réduit les résidus qui devraient être enfouis ou incinérés, de plus il produit un amendement de grande valeur agronomique améliorant ainsi les caractéristiques physiques et biochimiques du sol. À long terme, ceci conduit à de meilleures conditions de croissance et de résistance pour les végétaux. Enfin, l'effet sur la

fertilité du sol est non négligeable puisque le compost fournit des éléments majeurs (azote, phosphore, potassium) qui seront disponibles pour une période de temps prolongée.

Pour résumer, le succès du compostage des boues papetières dépend d'une multitude de facteurs, tels que la proportion du mélange qui détermine le rapport C/N initial qui idéalement doit être compris entre 25 et 30, la teneur en eau (50 - 70%) et surtout l'aération qui a pour but de fournir l'oxygène aux microorganismes. Pour que l'inoculation soit efficace, des conditions sont nécessaires :

- 1- apporter un type microbien essentiel de la matière organique de départ;
- 2- augmenter une population microbienne présente en proportion insuffisante ou;
- 3- introduire un ou plusieurs types de microorganismes plus efficace au niveau dégradation que la microflore indigène présente.

L'inoculation au début du compostage est probablement inutile puisque des différences non significatives sont relevées entre l'inoculation au début et après la phase thermophile. Nous pensons que la phase thermophile a agit comme une phase de destruction des microorganismes mésophiles contenus dans le consortium microbien.

À la lumière des données recueillies et discutées précédemment concernant l'effet de l'inoculation, nous pouvons conclure que l'ajout de microorganismes dans les boues papetières est efficace puisque l'inoculation a affecté positivement la vitesse de dégradation

Les résultats de ce travail feront bientôt l'objet d'une publication, en vue de démontrer l'apport scientifique.

REMERCIEMENTS

Je suis particulièrement reconnaissante envers mon directeur de recherche Monsieur Raymond Charbonneau de m'avoir acceptée comme candidate à la maîtrise. Je voudrais le remercier pour sa compréhension à travers les hauts et les bas de ma maîtrise et surtout pour la confiance qu'il m'a témoigné envers mes capacités à réaliser un tel travail. Un gros merci, Raymond!

Ma gratitude va également à Madame Chantal Thibault, agent de recherche, sans qui mon projet aurait été beaucoup plus pénible. Je la remercie pour son aide, pour l'atmosphère de travail très agréable et inoubliable, ainsi que pour son amitié sans faille.

Je ne peux passer sous silence la gentillesse de Monsieur Guy McSween que je remercie pour ses précieux conseils. Je remercie toute l'équipe du groupe de Microbiologie de l'environnement de l'Institut Armand-Frappier (IAF) pour leurs conseils et leurs nombreux débats scientifiques qui m'ont énormément motivé pour continuer et mener à bien ma recherche.

Ma reconnaissance va également à Madame Diane Sauvé, bibliothécaire pour sa compétence et ses nombreuses recherches bibliographiques. Merci aussi à Marie Désy, pour l'analyse statistique.

Je remercie cordialement la compagnie de produits forestiers Donohue Normick Inc. de Amos ainsi que le service de l'environnement de la Ville de Laval, qui nous ont respectivement fourni gracieusement les boues papetières et les composteurs.

J'adresse à mon époux Amar, toute ma reconnaissance pour sa patience, son encouragement et son appui constant durant les longs jours de rédaction.

En terminant, je tiens à remercier Servier Canada, la Fondation de l'Institut Armand-Frappier et mon directeur de recherche pour la bourse d'étude qu'ils m'ont octroyé et qui m'a été d'une très grande utilité.

BIBLIOGRAPHIE

Anonyme 1, 1996. Les 500 plus importantes entreprises au Québec. Les Affaires. pp. 52- 56.

Anonyme 2, 1995. Les pâtes et papiers. Un secteur dynamique en bordure des cours d'eau du Québec. Québec Science. 33(8): 20-21.

Anonyme 3, 1995. Les pâtes et papiers du Canada. Répertoire des produits fabriqués par les membres de l'association canadienne des pâtes et papiers.

Anonyme 4, 1992. Canada Gazette. Pulp and paper effluent regulations, part II.

A.C.P.P. 1987. Une moisson; mille et un usages. Brochure d'information sur l'industrie canadienne des pâtes et papiers. Service de l'information publique, 20 p

A.I.F.Q. 1995. Table de statistiques: "coup d'oeil 1995".

Alexander, M. 1977. Introduction to soil microbiology. Second Ed. John Wiley and Sons, New York, Santa Barbara, London, Toronto, 467 p.

Allison, F.E. 1973. Soil organic matter and its role in crop production. Elsevier Scientific Publishing Compagny, Amsterdam, London, New york, 637 p.

Bagstam, G., 1979. Population changes in microorganisms during composting spruce bark.II. Mesophilic and thermophilic microorganims during controlled composting. Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechn. 6 : 279-288.

Bell, R.G. Pos, J. and Lyon R.L., 1973. Production of composts from soft wood lumber mill wastes. Comp. Sci. Land Util. 14 (2): 5.

Besley, H.E. and Cook, R.J.,1971. Rapid controlled composting of organic wastes. Biolocal Department and Agricultural Department. The State University, N.J., 82 p.

Blosser, R. O., 1984. Pulp and paper sludges in Maine: a characterization study NCASI. Techn. Bull., 447 :11

Campbell, A.G., Engebretson, R. and Tripepi, R.R. 1991. Composting RMP/CMP pulp and paper sludge. Tappi J. 74(9): 183-190.

- Cappaert, I., Verdonck O. and De Boodt, M., 1976. Composting of bark from pulp mills and the use of bark compost as substrate for plant breeding. *Compost Science* 17 (4): 6.
- Chahal, D.S., Kluepfel, D., Morosoli, R. Shareck F., Laplante, S., and Rouleau D. 1995. Use of dyes in solid medium for screening ligninolytic activity of selective actinomycete. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 52 : 137-144.
- Charbonneau, Y., Lalande, F., Delisle, A. Dulude, M. et Gélina, 1990. *Les déchets dangereux au Québec*, Publ. Qc. ISBN 2-551-14303-9.
- Choinière, J. A. et Gangbazo, G. 1982. Étude sur le compostage à base de lisier de porcs. Département de Génie Rural, Université Laval, Québec, 154 p.
- Cochrane, C. 1980. Étude bibliographique sur l'amélioration des sols à partir des écorces de bois, feuillage et compost. Rapport rédigé pour le Service de la Recherche. Ministère de l'énergie et des ressources, Québec, 35 p.
- Commoner, B., Shapiro, K. and Webster, T., 1987. The origin of health risks of PCDD and PCDF, *Waste, Manage. Res.*, 5 : 327.
- Conseil de productions végétales du Québec. 1993. Méthodes d'analyses des sols, des fumiers et des tissus végétaux. AGDEX 533.
- Coulthard, T.L., 1989. Thermophilic anaerobic digestion process for producing animal nutrients and other digest products. *U.S. Pat.* 4 : 292-328.
- De Bertoldi, M. and Citernes, U. 1981. Microbial population in compost process. In: *Theory and practice for city, industry and farm.* pp. 26-33.
- De Bertoldi, M., Vallini, G., and Pera, A., 1983. The biology of composting : A review, *Waste Manage. Res.* 1 : 157 - 176.
- De Bertoldi, M., Vallini, G., Pera, A., and Zucconi, F., 1985. Technological aspects of composting including modelling and microbiological. In: *Composting of Agricultural and other wastes*, ed. J. K. R. Gasser. Elsevier Applied Science Publishers, London and New-York, pp.27-40.
- Demmel, D., 1979. Composting of farm yard. In: *Small Farm Energy Project; News Letter.* Nebraska, 17p.

- Dommergues, Y. et Mangenot, F. 1970. *Écologie microbienne du sol*. Masson et Cie. Paris, 769 p.
- Duchaufourt, P., 1967. *Précis de pédologie*. Édit. Masson et Cie. Paris, 481 p.
- Faure, D. and Deschamps, A.M. 1991. The effect of bacterial inoculation on the initiation of composting of grape pulps. *Biores. Technol.* 37: 235-238.
- Faust, J. and Romano, L.S. 1978. Composting sewage sludge by means of forced aeration pollution control branch of the public works. In : City of Windsor, p. 20.
- Finstein, M.S. and Morris, L. 1975. Microbiology of municipal solid waste composting. *Adv. Appl. Microbiol.* 19:113-151.
- Finstein, M.S. 1980. Composting Microbial Ecosystem: Implication for Process Design and Control. *Comp.Sc. Land. Util.* 2 (4) : 25-27.
- Flaig, W., 1972. An introductory review of humic substances: aspect of research on their genesis, Their physical and chemical properties and their effect on organisms. In: Povoldo, D. And Golterman, H.L. , 1975. Eds. *Humic substances*. Centre for agricultural publishing and documentation, p. 368.
- Fortin, J.A., Chapleau, M. et Couture, M., 1982. Décomposition de la matière organique et compostage de surface. *Revue de littérature*. Faculté de Foresterie et de Géodésie. Université Laval, Québec. 88 p.
- Gaur, A.C. 1979. Organic recycling prospects. In: *Indian Agric. Fert.News.* 24 (12): 49-61.
- Gaur, A.C., Sadasivam, K. V., Matthur, R.S. and Magu, S.P., 1982. Role of mesophilic fungi in composting. *Agric. Waste.* 4: 453-460.
- Gazette officielle du Québec, 7 octobre 1992, 124^e année, N° 43. P. 6045-6049. Règlement modifiant le règlement sur la fabrication des pâtes et papiers. Loi sur la qualité de l'environnement.
- Gerhardt, P., Murray, R.G.E., Costilow, R.N., Nester, E.N., Krieg, N.R. and Phillips, G.B., 1981. *Manuel of Methods for General Bacteriology*. American Society for Microbiology. Washington, DC 2006.

Golueke, C.G., Card, B. and McCaughey, P.H. 1954. A critical evaluation of inoculums in composting. *Appl. Microbiol.* 2: 45-51.

Golueke, C. G., 1972. *Composting. A study of the process and its principles.* Rodale Press Inc., Emmaus, 110 p.

Golueke, C.G., 1976. Composting : a review of rationale, principal, and public health. *Comp. Sci.* 17 (3) : 11-15.

Gotass, H.B., 1959. *Compostage et assainissement.* Organisation Mondiale de la Santé. Palais des nations. Genève, 210 pp.

Grappe industrielle de l'environnement 1994. *Stratégie de développement de l'industrie de la protection de l'environnement, le modèle québécois-Horizon 2003,* 133 p.

Gray, N.F. 1992. *Biology of waste water treatment.* Oxford University Press, Oxford. 828 p.

Hapwood, D.A, Bibb, M.J, Chater, K.F, Kieser, T., Bruton, C.J., Kieser, H.M., Lydiate, D.J., Smith, C.P., Ward, J.M. and Shrempf, H. 1985. *Genetic manipulation of streptomyces. A laboratory manual.* John Innes Foundation, Norwich. 356 p.

Keller, P., 1961. Method to evaluate maturity of compost. *Comp. Sci.* 2 : (3) 20-24.

Kostov, O., Petkova G. and Van Cleemput, O. 1994. Microbial indicators for Sawdust and bark compost stability and humification processes. *Biores. Technol.* 50: 193-200.

Lacroix, R.A., 1979. *Étude sur l'opportunité de réaliser une usine de compostage, de la mise en marché des produits et de sa rentabilité.* Roche et Ass. Rapport d'état à Environnement Canada, 225 p.

Langlois, C. A., 1969. *Recherche d'une méthode rapide d'évolution de la maturité du compost d'ordures ménagères.* Thèse de maîtrise. Université Laval. Mars. 63 p.

- Lavallée, H.C., 1994. La campagne de caractérisation des résidus de l'AIFQ. Conférence présentée au colloque sur l'environnement de l'AIFQ, tenu au Manoir du Lac Delage, 20 et 21 septembre.
- Lefebvre, D., 1993. L'industrie de la protection de l'environnement : les tendances réglementaires, le Novateur, 10 (2) : 2-3.
- Lossin, R., D., 1970. Compost studies, 11 : 6.
- Matthur, R.S., Magu, S.P., Sadasivam, K.V. and Gaur, A.C., 1986. Accelerated compost and improved yield. *Biocycle*. 27: 42-44.
- McCubbin, N. 1984. Techniques de base de l'industrie des pâtes et papiers et ses pratiques de protection de l'environnement. Rapport SPE6-EP-83-IF.
- Mote, C.R. and Griffis, C.L., 1978. Changes occurring in cottongin trash during the windrow composting process. *Arkansas Farm. Res.* 27 (6): 4.
- Murray, W.D. and Richardson, M. 1993. Development of biological and process technologies for the reduction and degradation of pulp mill wastes that pose a threat to human health, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* , 23 (2) :157-194.
- Mustin, M. 1987. Le compost. Gestion de la matière organique. Édit. François Dubusc, Paris, France, 954 p.
- Nakasaki, K., Fujiwara, S. and Kubota, H. 1994. A newly isolated thermophilic bacterium, *Bacillus licheriformis* HAI to accelerate the organic matter decomposition in high rate composting. *Compost Sci. Util.* 2: 88-96.
- Panet, J.P., 1991. Plan directeur de la gestion intégrée des déchets. Cahier technique. Le compostage. Ville de Montréal. Service des travaux publics, Module génie de l'environnement, 90 p.
- Pasti M., B and Grawford, D.L., 1991. Relationship between the abilities of streptomycetes to decolorize three anthron-type dyes and to degrade lignocellulose. *Can. J. Microbiol.* 37 : 902 - 907.
- Platt, M.W., 1984. Fungal activities involved in lignocellulose degradation by *Pleurotus ostreatus*. *App. Microbiol. Biotechnol.* 20: 150-154.

Poincelot, R. P. and Day, P.R., 1974. A scientific examination of the principles and practice of composting. *Comp. Sci. Land Utie.* 15 (3) : 24.

Pochon, J. et De Barjac, H., 1958. *Traité de microbiologie des sols. Applications agronomiques.* Dunod, Paris, 685 p.

Pochon, J. et Tardieux, P., 1962. *Techniques d'analyse en microbiologie du sol.* Ed. De la Tourelle. 111 p.

Pos, J., 1973. Production of compost from soft wood lumber mill waste. *Compost Sci.* 7 (7). 5.

Potvin, D. et Cloutier, R., 1989. *Le compostage au Québec : Problématique technique et inventaire des matériaux.* Sainte-foy, Centre québécois de la valorisation de la biomasse, 223 p.

Potvin, D. et Bernard, Y., 1993. *Essais de compostage des boues papetières.* Dossier CRIQ n° 640-PEO 4369.

Safwat, M.S.A., 1981. Composting cottonseed wates. In: *Composting : Theory and practice for city, industry and farm.* 184 - 198.

Sauvesty, A. et Tabi, M., 1995. *Le compostage au Québec.* Édit. Consortium sur le développement du compostage au Québec. 76 p.

Seekins B., 1986. Usable waste products for the farm. Main departement of Agriculture Food, and Rural Ressources, Augusta, Maine, *Farm. Res.* 25 :5-7.

Simons Ltée, H.A., 1992. *Étude sur la gestion des boues. Résumé, pour l'AIFQ en collaboration avec le MENVIQ et le Centre St-Laurent,* 104 p.

Tanaka, Y., Murata, A. and Hayashida, S., 1995. Accelerated composting of cereal shochu - distillery by actinomycetes-Seibutsu-Kogaku-Kaishi. *J. Soc. Ferm. Bioengin.* 73: 365- 372.

Toth, S.J. and Gold, B., 1971. *Composting.* In *Cornell University Conference on Agricultural Wastes Management Principales and Guidelines for Pratical solution.* New- york, 172 p.

Updegraff, D.M., 1969. Semi micro Determination of Cellulose in Biological Materials. In: Analytical Biochemistry, 32 : 420- 424.

Vogg, H., Metzger, M. and Steiglitz, P.L., 1987. Recent findings on the formation and decomposition of PCD/PCDF in municipal solid waste incineration. Waste Manage. Res. 5: 285.

Waksman, S.A. and Cordon, T.C., 1939. Thermophilic decomposition of plant residues in compost by pure and mixed culture of micro-organism. Soil. Sci. 47: 217.

Waksman, S.A., Cordon, T.C. and Hulpoi, N., 1939 a. Influence of temperature upon the microbiological population and decomposition process in composts of stable manures. Soil. Sci. 47, 83.

Waksman, S.A., Umbreit, W.W. and Cordon, T.C., 1939 b. Thermophilic actinomycetes and fungi in soils and in composts. Soil. Sci. 47, 1.

Waksman, S.A., 1952. Soil microbiology. John Willey and Sons Inc., 356 p.

Willson, G.B., 1971. Composting of Dairy Cow Wastes. In: American Society of Agricultural Engineers. Livestock Waste Management on Pollution Abatement. Michigan, 360 p.

Wysong, M.L., 1976. Sludge composting is one good answer. Tappi J. 59 (6): 21-22.

Yadav, K.S., Mishra, M.M. and Kapoor, K.K., 1982. The effect of fungal inoculation on composting. Agri. Wastes. 4 : 329-333.

Zucconi, F. and De Bertoldi, M., 1987. Compost specification for the production and characterization of compost from municipal solid waste .In: Compost : Production quality and use, Ed. De Bertoldi, M., Ferranti, M. P., L'Hermite, P. And Zucconi, F., Elsevier Applied Science, 457p.