# RECHERCHE DE TECHNIQUES DE COMPOSTAGE ADAPTÉES À UNE GESTION OPTIMALE DES FUMIERS

E5A1
A31
P68
1995
QMC
P. gouv.

## RAPPORT FINAL

**Réalisé par**

**Le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ)**

**Pour:**
**le ministère de l'Environnement et de la Faune,**
**Direction de la coordination de la recherche**

**Décembre 1995**

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Environnement
et de la Faune

E5A1
A31
P68
1995
QIMC
P. gouv.

# RECHERCHE DE TECHNIQUES DE COMPOSTAGE ADAPTÉES À UNE GESTION OPTIMALE DES FUMIERS

Par

Denis Potvin, agr. et Yves Bernard ing.
du
Centre de recherche industrielle du Québec

BIBLIOTHÈQUE CÉCILE-ROULEAU
GOUVERNEMENT DU QUÉBEC

400581

Cette étude a été réalisée en vertu
du programme d'aide financière,

**Programme d'aide à la recherche et au développement en environnement - volet aide à l'amélioration de la gestion des fumiers (PARDE-PAAGF)**

du
ministère de l'Environnement et de la Faune

AVERTISSEMENT: les opinions exprimées dans ce document n'engagent que la responsabilité des auteurs et non celle du ministère de l'Environnement et de la Faune. La mention de marques de commerce ou de noms de produits commerciaux ne sanctionne pas l'utilisation des produits en cause.

Contient plus de 50 % de fibres recyclées dont 10 % après consommation

Référence: POTVIN, Denis et BERNARD, Yves. *Recherche de techniques de compostage adaptées à une gestion optimale des fumiers : rapport final*. 1995. Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ). Québec : ministère de l'Environnement et de la Faune, 1995. 334 p. 3 annexes. AE95-19.

La reproduction de ce document est autorisée en mentionnant la source.

EN950616
AE95-19

# RECHERCHE DE TECHNIQUES DE COMPOSTAGE ADAPTÉES À UNE GESTION OPTIMALE DES FUMIERS

Dossier CRIQ n° 640-PE02786
Rapport technique n° RDQ-94-042(R2)

DÉCEMBRE 1995

CLIENT : Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF)
Direction de la coordination de la recherche
Programme d'aide à la recherche et au développement en environnement, volet amélioration à la gestion des fumiers (PARDE-PAAGF)
2360, Chemin Sainte-Foy, 3e étage, suite 03-02
Sainte-Foy (Québec) G1V 4H2

C.D. : Monique Charland-Forget


RESPONSABLE DE PROJET :

Denis Potvin, agr.

AVEC LA COLLABORATION DE :

Yves Bernard, ing.

Directeur :


Sainte-Foy, le 4 décembre 1995

## LA MISSION DU CRIQ

Le Centre de recherche industrielle du Québec, le CRIQ, a pour mission d'agir comme partenaire des milieux d'affaires, industriels et gouvernementaux pour stimuler le développement économique du Québec.

Comme organisation, le CRIQ offre, selon une approche intégrée qui favorise l'innovation, des services de recherche appliquée, de mise au point de produits et procédés, d'ingénierie de production, d'information industrielle et technologique, de transfert de technologie et de normalisation.

Le CRIQ opère sur une base contractuelle visant à recouvrer les frais associés aux travaux exécutés pour ses clients, avec un souci constant de la satisfaction de la clientèle, de la qualité de ses services et du développement des compétences de son personnel.

Parc technologique du Québec métropolitain, 333, rue Franquet, Sainte-Foy (Québec) Canada G1P 4C7
(418) 659-1550, 1-800-667-2386, Télécopie : (418) 652-2251

8475, avenue Christophe-Colomb, Montréal (Québec) Canada H2M 2N9
(514) 383-1550, 1-800-667-4570, Télécopie : (514) 383-3250

# RÉSUMÉ

Le projet de recherche qui s'est déroulé sur une période de trois ans (1990-1993) comportait 3 domaines majeurs d'interventions à savoir : l'acquisition de données de base sur l'utilisation des litières, les essais de compostage du fumier de bovins laitiers et le développement et la mise en place d'un procédé novateur de compostage en réacteur à la ferme. L'ensemble de ces travaux avait pour but de préciser la place du compostage sur les fermes laitières et d'établir des scénarios de gestion du fumier par compostage en tenant compte notamment des aspects environnementaux du procédé.

## UTILISATION DES LITIÈRES COMME ABSORBANTS

Les essais portant sur l'absorption en eau de divers matériaux absorbants visaient à acquérir des données de base supplémentaires sur le comportement des matériaux absorbants disponibles au Québec et potentiellement utilisables comme litière à la ferme. Au total, 17 matériaux organiques ont été retenus pour fins de caractérisation et pour les essais d'absorption en eau et de compression en laboratoire. La quantité d'eau absorbée effective (QEA eff.) en fonction du temps et de la pression, la capacité d'absorption en eau (CAE) en fonction de la teneur en eau sur une base humide (TEE b.h.) et le taux d'affaissement ont été déterminés pour divers types de paille, de tourbes de sphaignes, de sciures de bois et autres matériaux comme le foin, les écorces, la ripe, les copeaux de bois, le papier et les boues papetières.

Les teneurs en eau des absorbants varient considérablement d'un matériel à l'autre et dans certains cas, pour un même matériel. Pour cette raison, la comparaison des CAE des divers matériaux doit se faire en considérant la TEE réelle des litières. Sur une base de masse humide à une TEE obtenue, on note des valeurs décroissantes de CAE b.h. pour les matériaux suivants : les tourbes, la ripe de pin, la paille d'orge, la paille d'avoine, le papier journal et le foin.

En ce qui concerne la vitesse d'absorption, la tourbe blonde est le matériau qui a absorbé la plus grande quantité d'eau, suivie de la tourbe noire, de la ripe de pin, du papier journal haché, de la tourbe brune, des pailles, du foin et des résidus de bois et ce, pour un temps d'imbibition de 24 heures.

Lorsqu'ils sont soumis à des pressions, les matériaux subissent des pertes d'eau qui diffèrent d'un matériel à l'autre. On note par ordre décroissant de pertes d'eau, les tourbes et le papier journal, les pailles et le foin et les résidus de bois. Pour certains matériaux comme les tourbes et le papier journal, la perte d'eau s'effectuera même si de faibles pressions sont appliquées. Pour d'autres matériaux, la perte d'eau s'effectuera à des pressions supérieures à 24 kPa (pailles, foin et résidus de maïs). Les pertes d'eau des litières à base de résidus de bois ne sont pas influencées par les pressions appliquées. Pour des pressions variant entre 0 et 36 kPa, les sciures, les écorces et les copeaux ont conservé la quasi-totalité de l'eau absorbée.

La surface de contact entre les matériaux et le liquide étant optimale au laboratoire comparativement au dalot de la ferme, les valeurs de QEA eff. du laboratoire ne sont pas directement transposables à la ferme laitière. Des essais ont donc été effectués avec des quantités variables (1 à 6 kg/unité animale-jour) de paille pour préciser le comportement de ce type d'absorbant au dalot. Lors de l'écurage, les liquides non absorbés par la litière ont été recueillis à la base de la montée d'écureur. L'utilisation de paille à des quantités variant de 1 à 6 kg/u.a.-jour n'a pas permis de réduire la quantité de liquide non absorbée au dalot. La qualité du contact paille/urine et le temps d'absorption ont permis d'absorber qu'une fraction de l'urine produite. Comparativement à une production théorique d'urine estimée à 12,5 kg/u.a.-jour, la quantité de liquides non absorbés au dalot correspond à une production moyenne de 5,5 L/u.a.-jour.

## ESSAIS DE COMPOSTAGE DU FUMIER

Les essais de compostage ont été réalisés à l'été 1992 (de la fin mai à la mi-octobre) sur le site expérimental de compostage localisé sur les terrains du CRIQ. Au total, 4 fumiers d'origine différente ont été mis à l'essai sur les plates-formes. Les différents traitements se distinguent par la quantité de litière utilisée, le nombre de retournements et le recouvrement ou non des composts. Les fumiers ont été compostés en piles d'environ 1,5 m de hauteur, 4 m de largeur et 5 m de longueur sur une période d'environ 140 jours. Durant cette période les précipitations ont été assez importantes, 613 mm pour la durée totale des essais dont 250 mm pour le mois de juillet. En plus d'effectuer le suivi des paramètres du compostage, le bilan massique complet pour la masse totale, la matière organique, l'azote, le phosphore et le potassium a été réalisé pour l'ensemble des traitements. Les volumes de lixiviats produits ainsi que leurs caractéristiques (NTK, $NH_4$, $NO_3$, Ptot, Ktot, TEE, $DBO_5$, DCO, MES, pH, CE et coliformes fécaux et totaux) ont été mesurées périodiquement.

Pour les essais de compostage sur plates-formes, les températures ont été égales ou supérieures à 45 °C. Les porosités des fumiers les plus élevées (> 60 %) ont induit les plus fortes élévations de température (> 60 °C). Ces valeurs de porosité sont obtenues lorsque la teneur en eau des fumiers (avec paille non hachée) est inférieure à 80 %.

Pour l'ensemble des fumiers compostés, les pertes de masse se situent entre 42 et 67 % et les pertes de volume entre 27 et 57 % et ce, après 140 jours de compostage; la plus faible perte a été obtenue avec le compost non retourné. Pour les composts non couverts, les pertes en azote totales varient de 37 à 64 %, celles en phosphore de 12 à 24 % et celles en potassium de 54 à 61 %. Le compostage sous abri a permis de réduire de façon importante les pertes en phosphore (inférieures à 5 %) et en potassium (inférieures à 27 %) alors que les pertes en azote ont été légèrement inférieures pour les composts couverts comparativement aux composts non couverts.

En dépit des pertes encourues en cours de compostage, les composts ont une valeur monétaire, basée sur la valeur en N-$P_2O_5$-$K_2O$ pour une masse donnée, généralement plus élevée que celle des fumiers non compostés. La valeur monétaire des fumiers varie de 10,00 à 16,00 $/t.m. sur base humide. Elle se situe entre 12,50 et 16,40 $/t.m. pour les composts non couverts et à environ 22,90 $/t.m. pour les composts couverts. Les pertes d'éléments fertilisants en cours de compostage représenteraient 50 % de la valeur initiale du fumier pour les composts non couverts et 25 % pour les composts couverts.

Tous les composts à l'étude, incluant les traitements couverts, ont généré des lixiviats au cours du compostage. L'utilisation de litière à raison de 2, 4 et 6,4 kg/u.a.-jour à la ferme, n'a pas permis d'atteindre des niveaux d'humidité suffisamment bas pour éviter la production de lixiviat en cours de compostage. À la lumière de ces essais, il appert qu'à une TEE du fumier ou du compost inférieure à 70 %, il n'y aurait pas de lixiviat de produit.

La charge polluante des lixiviats générés lors du compostage est suffisamment importante pour créer des impacts négatifs à l'environnement s'ils se retrouvaient directement dans le cours d'eau. La DCO moyenne des lixiviats générés au cours des premiers jours du compostage a été de 58 000 mg $O_2$/L. Les lixiviats produits tout au cours du compostage provenant des composts couverts avaient une DCO moyenne de 30 000 mg $O_2$/L; celle des liquides provenant des composts non couverts a été de 21 000 mg $O_2$/L. On remarque une baisse de la teneur en éléments polluants des lixiviats en cours de compostage notamment pour la DCO et la $DBO_5$, les coliformes totaux et fécaux, les MES, les teneurs en azote et en phosphore. La teneur en potassium et la conductivité électrique des lixiviats ont été élevées tout au cours des essais. De façon générale, la charge en éléments fertilisants est plus importante en début de compostage qu'à la fin.

Le recouvrement du compost a permis de réduire de façon importante le volume de lixiviats produit en cours de compostage. Les essais de compostage sous couverts permettent d'affirmer que le recouvrement des andains de compost à la ferme est une avenue à privilégier. L'utilisation de toiles adaptées au compostage et aux conditions climatiques québécoises apparaît comme une pratique qui a du sens tant d'un point de vue environnemental qu'agronomique.

Le suivi effectué en 1991 et 1992 sur 6 fermes déjà impliquées dans le compostage du fumier avait pour but d'obtenir des données sur certains aspects du compostage pratiqué dans le contexte de la ferme : quantité de litière, production et caractérisation des lixiviats, recouvrement des andains, caractérisation des sols sous les andains de compost.

Le compostage du fumier en andain tel qu'il se pratique à la ferme (4 à 6 kg de litière/u.a.-jour) n'a pas permis de respecter l'ensemble des paramètres du compostage bien que le déroulement des processus de compostage s'est effectué de façon satisfaisante. Parmi les paramètres de compostage qui n'atteignent pas les valeurs optimales, on note une teneur en eau élevée (plus de 74 %) et un rapport C/N bas (< 20).

Tous les andains de composts à la ferme ont produits des lixiviats. Cependant les lysimètres qui ont été installés sous les andains de composts ont permis de récolter des quantités variables de lixiviats inférieures à celles obtenues des plates-formes de béton du CRIQ.

Selon le mode de gestion des fumiers actuellement pratiqué sur les fermes, l'addition d'absorbants comme seul technique devant empêcher complètement l'écoulement de lixiviat dans le sol exigerait des quantités trop importantes de matières pour être viable sur les fermes.

Le recouvrement des andains de compost à l'aide d'une toile perméable à l'air et imperméable aux précipitations qui tombent sur l'andain de compost s'est traduit par une diminution de l'humidité du compost et du volume de lixiviats récolté.

La contrainte environnementale majeure du compostage en andains à la ferme réside dans la production et la gestion adéquate des lixiviats générés en cours de compostage. Les solutions alternatives doivent éliminer les lixiviats issus du ressuyage du fumier trop humide au départ et ceux causés par des précipitations importantes en cours de compostage.

## COMPOSTAGE EN RÉACTEUR

Les objectifs des travaux de compostage en réacteur à la ferme visaient l'établissement de la faisabilité technique de cette approche par la conception, l'installation et l'opération d'un système de compostage en continu. Le développement du concept novateur de compostage en réacteur reposait sur un ensemble d'hypothèses et d'objectifs qui ont été établis au début du projet conjointement avec Les Consultants BPR inc. et les propriétaires de la ferme laitière où nous avons mis à l'essai ce réacteur.

Étant donnée le peu d'espace disponible dans l'annexe à compost et le niveau d'automatisation requis, le choix du procédé de compostage s'est orienté vers un réacteur vertical qui se décharge par le bas. Le développement d'un système de fourches permettait d'assurer le déchargement d'une quantité précise de compost. De plus ce système permettait une aération dans l'espace libre entre les fourches et le fond du réacteur (plénum).

Lors de la conception du système, la nécessité d'un système d'essorage du fumier pour assurer un compostage optimisé en réacteur est apparue rapidement. Cependant, l'essorage du fumier occasionne l'entreposage et la gestion d'une fraction importante de liquide d'essorage (plus du double du volume habituellement rencontré).

Le compostage en réacteur du fumier essoré a permis d'obtenir une réduction de 25 % de la masse et du volume et ce, après 30 jours de compostage. L'implantation à la ferme d'un réacteur à compost complètement automatisé et fiable entraîne des contraintes techniques complexes. Pour fonctionner sans surveillance constante, le système d'essorage, le système d'alimentation et de vidange du réacteur doivent être mécaniquement fiables et simples. Le système de compostage en réacteur développé et mis à l'essai est apparu coûteux et complexe compte tenu des gains environnementaux et agronomiques. Finalement, la mise en place d'un procédé de compostage en réacteur ajoute une étape supplémentaire à la gestion conventionnelle du fumier (évacuation, entreposage, épandage).

Avant de poursuivre les travaux de compostage en réacteur du fumier de bovins laitiers, il serait intéressant de procéder au développement d'une essoreuse à fumier et d'initier un projet de démonstration à la ferme de la gestion du fumier de bovins laitiers par essorage du fumier et compostage en tas couvert de la fraction essorée.

## SCÉNARIOS DE COMPOSTAGE

En conclusion, les fumiers de bovins laitiers de la façon dont ils sont gérés actuellement (évacuation et entreposage) sur les fermes laitières québécoises, sont habituellement très humides et leur rapport C/N faibles; au départ, ces 2 paramètres ne respectent pas les critères de compostage. En conséquence, la production de lixiviats et la perte d'azote par volatilisation apparaissent inévitables. Certains correctifs apportés à la composition du fumier jumelés à une bonne gestion de ce dernier par compostage pourraient diminuer l'ampleur de ces problèmes.

À la lumière des résultats obtenus par la réalisation des diverses investigations, 4 scénarios de compostage du fumier de bovins laitiers ont été identifiés comme avenues de gestion du fumier dans le contexte pratique de la ferme.

- La gestion du fumier sous forme exclusivement solide,

  avec utilisation massive de litière (1B);
  ou absorption complète des liquides au dalot (2A).

- La gestion du fumier sous forme solide et liquide,

  avec séparation des urines au dalot (1A);
  ou essorage mécanique du fumier (2B).

L'élaboration de ces scénarios est basée sur 2 grandes approches. La première approche consiste à gérer la totalité du fumier sous forme solide en réduisant au minimum la production et la gestion de lixiviats. La seconde approche s'appuie sur une gestion adéquate de la fraction solide par compostage et de la fraction liquide entreposée. Les scénarios de compostage élaborés visent tous à minimiser l'impact environnemental du procédé par une gestion adéquate des fractions liquide et solide du fumier.

Les 4 scénarios incluent la mise en place d'une toiture rigide pour la couverture du fumier à l'entreposage et l'utilisation de toiles semi-perméables pour le recouvrement des andains de compost au champs afin d'éliminer la production de lixiviats et de préserver la valeur fertilisante des fumiers et des composts. L'entreposage du fumier sur le sol est envisageable pour les scénarios 1B et 2B puisque les opérations requises permettent d'abaisser de façon importante la teneur en eau du fumier destiné au compostage.

Pour opérer selon le scénario 1A, l'agriculteur devra installer dans le fond du dalot un système de grille perforée pour récupérer les urines. D'autre part l'ajout au dalot d'une grande quantité d'un absorbant à granulométrie fine sera nécessaire pour opérer selon le scénario 2A.

Dans le contexte pratique de la ferme laitière, 2 scénarios de compostage adaptés à la gestion actuelle du fumier ont été retenues (1A et 2A). Ces 2 scénarios sont basés sur l'utilisation de quantités de litière réalistes (5 ou 9 kg d'absorbants/u.a.-jour), la mise en place d'un entrepôt à fumier muni d'un plancher étanche, l'utilisation d'un lit absorbant sous l'andain et l'emploi de toiles semi perméables sur le compost. Tout en minimisant l'impact environnemental du procédé, ces scénarios pourraient être mis en place rapidement sur la majorité des fermes laitières. Le choix final du scénario de compostage doit se faire suivant une analyse rigoureuse, en regard du contexte particulier de chaque exploitation agricole.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tous les membres de l'équipe qui ont travaillé, sous la direction de monsieur Camil Dutil, ing. de la firme «Les Consultants BPR Inc.», à la conception du système de compostage novateur. Nos remerciements s'adressent également au personnel de Dutech Machinerie Ltée qui a fabriqué et mis en place les éléments mécaniques du procédé.

Nous remercions très sincèrement monsieur Jean-Marie Laliberté et madame Céline Laliberté propriétaires de la Ferme Berthely inc. pour leurs judicieux conseils et leur active participation dans les travaux de compostage en réacteur à la ferme sans qui, des travaux de cette envergure auraient été irréalisables.

Les auteurs remercient chaleureusement tous les intervenants du milieu agricole oeuvrant comme exploitants agricoles qui ont participé activement aux travaux de recherche. Avec regret et en raison du contexte réglementaire actuel sur la gestion des fumiers par compostage, nous préférons conserver leur anonymat.

La contribution technique du personnel de la Direction de la recherche et des technologies environnementales et de la Direction du milieu agricole et du contrôle des pesticides du ministère de l'Environnement et de la faune du Québec s'est avérée précieuse tout au cours de ce projet. Nous remercions spécialement messieurs Sylvain Beauregard, Stéphane Gariépy, Marc Hébert, Carol Émond et Pierre Vallée et madame Marie-France Blais pour leur collaboration.

Nos remerciements s'adressent également aux personnes suivantes pour leurs implications dans les travaux réalisés à la ferme : messieurs Rolland Allard, Bruno Larose, Florent Leclerc, Majella Pichette et Robert Robitaille.

## ÉQUIPE DE TRAVAIL

| | |
|---|---|
| Gérant de projet : | Paul Toupin, ing. |
| Responsable technique : | Denis Potvin, agr. |
| Collaborateur : | Yves Bernard, ing. |
| Technicien : | Sylvain Allard |
| Technicien : | Paul Locas |
| Secrétaire : | Ursule Plourde |
| Secrétaire : | Marie-Claude Potvin |
| Secrétaire : | Martine Hardy |

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

# AVANT-PROPOS

Le compostage en andain du fumier de bovins laitiers constitue un mode de gestion du fumier qui suscite depuis quelques années, un intérêt croissant. Cette forme de gestion des fumiers se retrouve déjà sur un certain nombre d'exploitations agricoles québécoises notamment celles qui pratiquent une agriculture biologique où qui sont engagées dans le processus de transition.

Puisque le compostage s'imbrique dans un mode de gestion solide du fumier, il représente d'un point de vue environnemental, une avenue alternative au mode de gestion liquide des fumiers de bovins laitiers. Pour cette raison, le compostage du fumier de bovins se retrouve également, dans une moindre mesure, chez les producteurs qui pratiquent une agriculture conventionnelle.

A l'instar des autres modes de gestion des fumiers, le compostage comporte une série d'avantages et d'inconvénients qui sont basés sur des considérations agronomiques, environnementales et économiques; cette filière ne constitue pas une solution miracle pour l'ensemble des exploitations agricoles laitières.

Au Québec, le compostage du fumier en andain à l'extérieur est la technique la plus utilisée par les producteurs. L'alternative de composter en continu dans un enceinte couverte suscite actuellement un vif intérêt et mérite, en ce sens, une attention particulière. Quelque soit la technique de compostage, les paramètres qui influencent le déroulement des processus de transformation de la matière organique sont les mêmes. Dans cette optique, trois aspects majeurs doivent être considérés soit: l'optimisation du substrat à composter et de la technique de compostage ainsi que l'impact environnemental de ce mode de gestion du fumier.

L'objectif principal de la présente étude consiste à démontrer le potentiel technico-économique du compostage du fumier de bovins laitiers solide et de déterminer la place de divers procédés dans la cadre d'une gestion optimale du fumier. Pour ce faire, trois aspects majeurs du compostage sont investigués soit: l'acquisition de données de base sur l'emploi de litières, l'impact de diverses techniques de compostage en andain ou de divers types de fumiers de bovins sur le déroulement du compostage et sur la production de lixiviats et, le développement et l'implantation à la ferme d'un procédé de compostage en réacteurs.

Chacun de ces aspects a fait l'objet de divers travaux de recherches réalisés en laboratoire, sur des sites expérimentaux de compostage et/ou sur des fermes laitières québécoises entre 1991 et 1993.

L'ensemble du rapport comprend sept chapitres distincts. Compte tenu de la diversité des travaux réalisés et dans le but de faciliter la lecture, chaque domaine d'investigation particulier fait l'objet d'un chapitre spécifique complet.

Le premier chapitre constitue un bref rappel de certaines notions de base portant sur le contexte de production du fumier de bovins laitiers à la ferme ainsi que sur le compostage. Avant d'entreprendre la présentation des résultats des travaux, il nous est apparu nécessaire de préciser certains aspects particuliers du compostage des fumiers à la ferme.

Le second chapitre présente les résultats des essais d'absorption en eau de divers matériaux absorbants réalisés en laboratoire. Les essais d'absorption réalisés à la ferme avec diverses quantités de paille ainsi qu'une réflexion sur les contraintes d'utilisation des litières utilisées à la ferme, dans une optique de compostage, font l'objet du troisième chapitre.

Le quatrième chapitre présente les résultats des essais de compostage du fumier de bovins laitiers réalisés sur la plate-forme expérimentale du CRIQ.

L'ensemble des travaux de compostage réalisés sur diverses fermes laitières sont décrits au cinquième chapitre. On y retrouve les résultats des suivis ponctuels effectués sur quatre fermes laitières pratiquant le compostage et de ceux issus d'essais particuliers de compostage de fumier de bovins qui ont fait l'objet d'un suivi plus rigoureux.

Le sixième chapitre présente l'ensemble des travaux portant sur la conception, la mise en place et l'opération d'un système de compostage en réacteur sur une ferme laitière.

Enfin, le septième chapitre constitue une synthèse de l'information présentée dans les chapitres précédents. Par le biais d'une discussion générale, ce dernier chapitre vise à établir des liens entre les divers travaux dans le but de dégager les contraintes inhérentes au compostage du fumier de bovins laitiers à la ferme. On y retrouve également des recommandations portant sur les besoins de recherche et de développement découlant des travaux de compostage réalisés à ce jour.

# TABLE DES MATIÈRES

Page

**CHAPITRE 1 : NOTIONS DE BASE SUR LE COMPOSTAGE DES FUMIERS DE BOVINS LAITIERS À LA FERME**

1.1 INTRODUCTION . . . . . 1

1.2 CONTEXTE DE LA FERME LAITIÈRE . . . . . 1
1.2.1 GESTION DES FUMIERS . . . . . 1
1.2.1.1 Évacuation du fumier . . . . . 3
1.2.1.2 Entreposage du fumier . . . . . 3
1.2.1.3 Compostage du fumier . . . . . 4
1.2.1.4 Caractéristiques du fumier de bovins laitiers . . . . . 4

1.3 NOTIONS DE BASE SUR LE COMPOSTAGE . . . . . 6
1.3.1 DÉFINITION DU COMPOSTAGE ET DU COMPOST . . . . . 6
1.3.2 OBJECTIFS DU COMPOSTAGE . . . . . 7
1.3.2.1 Avantages du compostage du fumier . . . . . 8
1.3.2.2 Inconvénients du compostage . . . . . 8
1.3.3 PARAMÈTRES DU COMPOSTAGE ET VALEURS RECHERCHÉES . . 9
1.3.3.1 Teneur en eau (humidité) et espace lacunaire (porosité effective) . . . . . 10
1.3.3.2 Rapport C/N . . . . . 10
1.3.3.3 Teneur en oxygène (oxygénation) . . . . . 11
1.3.3.4 Température . . . . . 11
1.3.3.5 pH . . . . . 12
1.3.4 PROCESSUS DE TRANSFORMATION ET DE PERTES LORS DU COMPOSTAGE . . . . . 12
1.3.4.1 Matière organique . . . . . 14
1.3.4.2 Azote . . . . . 14
1.3.4.3 Phosphore . . . . . 15
1.3.4.4 Potassium . . . . . 15

1.4 COMPOSTAGE DES FUMIERS À LA FERME . . . . . 15
1.4.1 CONTEXTE . . . . . 16
1.4.2 PROBLÉMATIQUE . . . . . 17

1.5 CONCLUSION . . . . . 20
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES . . . . . 23

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

**CHAPITRE 2 : CARACTÉRISTIQUES DE DIVERS ABSORBANTS EN LABORATOIRE**

2.1 INTRODUCTION . . . . . 25

2.2 OBJECTIFS . . . . . 26

2.3 REVUE DE LITTÉRATURE . . . . . 26

2.4 MATÉRIEL ET MÉTHODE . . . . . 28
2.4.1 MATÉRIAUX . . . . . 28
2.4.2 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE . . . . . 29
2.4.2.1 Caractérisation des matériaux . . . . . 29
2.4.2.2 Essais d'absorption/compression en laboratoire . . . . . 32
2.4.2.2.1 Essais d'absorption en eau et en urine . . . . . 32
2.4.2.2.2 Essais de compression . . . . . 34

2.5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS . . . . . 36
2.5.1 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES ABSORBANTS . . . . . 36
2.5.2 CARACTÉRISTIQUES ABSORBANTES DES MATÉRIAUX . . . . . 41
2.5.3 EFFET DE LA COMPRESSION SUR LES CARACTÉRISTIQUES ABSORBANTES DES MATÉRIAUX . . . . . 54
2.5.4 COÛTS D'ABSORPTION EN EAU POUR DIVERS ABSORBANTS . . . 60

2.6 CONCLUSION . . . . . 62

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES . . . . . 64

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

**CHAPITRE 3 : UTILISATION DES LITIÈRES À LA FERME**


3.1 INTRODUCTION . . . . . 65

3.2 OBJECTIFS . . . . . 66

3.3 DESCRIPTION DES TRAVAUX . . . . . 66

3.4 ESSAIS COMPARATIFS D'ABSORPTION EN EAU ET EN URINE DE TROIS TYPES D'ABSORBANTS . . . . . 66
3.4.1 MÉTHODOLOGIE . . . . . 66
3.4.2 RÉSULTATS . . . . . 67

3.5 QUANTITÉS DE LITIÈRE REQUISES . . . . . 67
3.5.1 ABSORPTION DES LIQUIDES ET TENEUR EN EAU DU FUMIER . . . 68
3.5.2 QUANTITÉS DE LITIÈRE ET POROSITÉ DU FUMIER . . . . . 71
3.5.2.1 Méthodologie . . . . . 71
3.5.2.2 Résultats . . . . . 72
3.5.3 QUANTITÉS DE LITIÈRE ET RAPPORT C/N DU FUMIER . . . . . 74

3.6 ESSAIS D'ABSORPTION DE LA PAILLE À LA FERME . . . . . 76
3.6.1 MÉTHODOLOGIE . . . . . 76
3.6.2 RÉSULTATS . . . . . 79

3.7 CONCLUSION . . . . . 82

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES . . . . . 85

# TABLE DES MATIÈRES

Page

**CHAPITRE 4 : ESSAIS DE COMPOSTAGE DU FUMIER DE BOVINS LAITIERS SUR PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE : ÉTÉ 1992**

4.1 INTRODUCTION . . . . . 86

4.2 OBJECTIFS . . . . . 87

4.3 MÉTHODOLOGIE . . . . . 87
4.3.1 CHOIX DES SCÉNARIOS . . . . . 87
4.3.2 DESCRIPTION DU SITE DE COMPOSTAGE EXPÉRIMENTAL ET DES ÉQUIPEMENTS . . . . . 88
4.3.3 FUMIERS DE BOVINS LAITIERS À L'ÉTUDE . . . . . 93
4.3.4 MÉTHODE DE COMPOSTAGE . . . . . 95
4.3.5 MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE . . . . . 96
4.3.5.1 Fumiers et composts . . . . . 96
4.3.5.2 Lixiviats . . . . . 96
4.3.6 MÉTHODES D'ANALYSE . . . . . 97
4.3.6.1 Fumiers et composts . . . . . 97
4.3.6.2 Méthodes d'analyses des lixiviats . . . . . 98

4.4 RÉSULTATS . . . . . 100
4.4.1 CARACTÉRISTIQUES INITIALES DES FUMIERS . . . . . 100
4.4.2 ÉVOLUTION DES PARAMÈTRES EN COURS DE COMPOSTAGE . . 102
4.4.2.1 Températures . . . . . 102
4.4.2.2 Teneurs en oxygène . . . . . 105
4.4.2.3 pH . . . . . 107
4.4.2.4 Conductivité électrique . . . . . 108
4.4.2.5 Teneur en eau . . . . . 108
4.4.2.6 Matière organique . . . . . 109
4.4.2.7 Azote total, ammoniacal et nitrique . . . . . 110
4.4.2.8 Rapport C/N . . . . . 113
4.4.2.9 Phosphore . . . . . 114
4.4.2.10 Potassium . . . . . 115
4.4.3 PERTES EN COURS DE COMPOSTAGE . . . . . 116
4.4.3.1 Volume . . . . . 118
4.4.3.2 Masse totale . . . . . 119
4.4.3.3 Matière organique . . . . . 119

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

4.4.3.4 Phosphore . . . . . 121
4.4.3.5 Potassium . . . . . 122
4.4.3.6 Azote . . . . . 122
4.4.3.7 Aspects économiques des pertes en éléments majeurs . . . . . 123
4.4.4 CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS . . . . . 126
4.4.5 BILAN DE L'EAU . . . . . 136
4.4.5.1 Composts non couverts . . . . . 136
4.4.5.2 Lixiviats de la grille centrale . . . . . 139
4.4.5.2.1 Production totale de lixiviats . . . . . 141
4.4.5.2.2 Lixiviation et évaporation . . . . . 141
4.4.5.3 Composts couverts . . . . . 143
4.4.6 CHARGE DES LIXIVIATS DES COMPOSTS NON-COUVERTS . . . . . 147
4.4.6.1 Calcul de la charge cumulée des lixiviats . . . . . 147
4.4.6.2 Évolution des charges perdues dans les lixiviats . . . . . 148
4.4.7 CARACTÉRISTIQUES AGRONOMIQUES DES COMPOSTS . . . . . 153

4.5 DISCUSSION . . . . . 157
4.5.1 QUANTITÉS DE LITIÈRE DANS LE FUMIER (C3, C4 ET C6) . . . . . 157
4.5.2 EFFETS DES RETOURNEMENTS (C4 ET C5) . . . . . 158
4.5.3 EFFETS DU RECOUVREMENT (C1 ET C6) . . . . . 160
4.5.4 EFFET DE L'ESSORAGE . . . . . 161

4.6 CONCLUSION . . . . . 162

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES . . . . . 165

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

page

**CHAPITRE 5 : COMPOSTAGE DES FUMIERS DE BOVINS LAITIERS À LA FERME**


5.1 INTRODUCTION . . . . . 167

5.2 OBJECTIFS . . . . . 168

5.3 MÉTHODOLOGIE . . . . . 169
5.3.1 DESCRIPTION DES SITES DE COMPOSTAGE . . . . . 173
5.3.1.1 Ferme A . . . . . 173
5.3.1.2 Ferme B . . . . . 173
5.3.1.3 Ferme C . . . . . 174
5.3.1.4 Ferme expérimentale de l'ITA de La Pocatière (IT) . . . . 174
5.3.1.5 Ferme E . . . . . 175
5.3.1.6 Ferme Rolland Allard, St-Nicolas (RA) et site expérimental de compostage du CRIQ, Sainte-Foy . . . . . 176
5.3.1.6.1 Ferme RA . . . . . 180
5.3.1.6.2 CRIQ . . . . . 180
5.3.2 DESCRIPTION DES ESSAIS DE COMPOSTAGE . . . . . 181

5.4 RÉSULTATS . . . . . 184
5.4.1 FUMIER DE BOVINS . . . . . 184
5.4.2 COMPOSTS . . . . . 186
5.4.3 ÉVOLUTION DES PARAMÈTRES . . . . . 191
5.4.3.1 Température et oxygène . . . . . 191
5.4.4 PERTES EN COURS DE COMPOSTAGE . . . . . 195
5.4.5 LIXIVIATS . . . . . 196
5.4.5.1 Ferme B . . . . . 196
5.4.5.2 Ferme C . . . . . 199
5.4.5.3 Ferme IT . . . . . 202
5.4.5.4 Ferme E . . . . . 204
5.4.5.5 Ferme RA . . . . . 208
5.4.5.6 CRIQ . . . . . 210
5.4.5.7 Résumé des analyses de lixiviats . . . . . 213

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

5.4.5.8 Comparaisons des volumes de lixiviats au CRIQ sur plates-formes de béton et à la ferme avec les lysimètres de sol. . . . . 217
5.4.6 SOLS . . . . . 222

5.5 TECHNIQUES D'OPTIMISATION DU COMPOSTAGE À LA FERME . . . . . 226
5.5.1 EFFETS DU RECOUVREMENT . . . . . 226
5.5.1.1 Température, $O_2$ et déroulement des processus de compostage . . . . . 227
5.5.1.2 Pertes de masse et de volume . . . . . 227
5.5.1.3 Évolution des TEE en cours de compostage . . . . . 228
5.5.1.4 Évolution des teneurs en éléments fertilisants des composts en cours de compostage . . . . . 230
5.5.1.5 Volume de lixiviats . . . . . 233
5.5.1.6 Caractéristiques des lixiviats . . . . . 233
5.5.2 EFFETS DES ABSORBANTS (À LA BASE DE L'ANDAIN) SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS . . . . . 234

5.6 CONCLUSION . . . . . 236

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES . . . . . 239

# TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page


**CHAPITRE 6 : COMPOSTAGE AVEC UN RÉACTEUR PROTOTYPE DU FUMIER DE BOVINS LAITIERS (CONCEPT NOVATEUR)**

6.1 CONTEXTE . . . . . 240

6.2 OBJECTIFS . . . . . 241

6.3 CONCEPTION DU RÉACTEUR PROTOTYPE, NOVATEUR . . . . . 242
6.3.1 CONTRAINTES . . . . . 242
6.3.2 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU CONCEPT . . . . . 244

6.4 MATÉRIEL ET MÉTHODE . . . . . 246
6.4.1 DESCRIPTION DE LA FERME . . . . . 246
6.4.1.1 Troupeau . . . . . 246
6.4.1.2 Litières . . . . . 246
6.4.1.3 Déjections . . . . . 247
6.4.1.4 Évacuation des fumiers . . . . . 247
6.4.1.5 Structures de compostage et d'entreposage des fumiers 247
6.4.1.6 Épandage des fumiers et composts . . . . . 248
6.4.2 DESCRIPTION DU PROCÉDÉ . . . . . 248
6.4.2.1 Essoreuse à fumier . . . . . 248
6.4.2.2 Réacteurs à compostage . . . . . 250
6.4.2.2.1 Fonctionnement du concept novateur de compostage . . . . . 253
6.4.3 OPÉRATION ET ÉCHANTILLONNAGE . . . . . 256
6.4.3.1 Équipements de mesure et méthodes d'analyse . . . . . 256
6.4.3.1.1 Équipements de mesure . . . . . 256
6.4.3.1.2 Méthodes d'analyse . . . . . 258
6.4.4 DESCRIPTION DES ESSAIS . . . . . 259
6.4.4.1 Essorage du fumier . . . . . 259
6.4.4.2 Compostage en réacteur . . . . . 260
6.4.4.3 Compostage en tas de la fraction solide du fumier essoré (sans utilisation des réacteurs) . . . . . 261

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

6.5 RÉSULTATS . . . . . 262
6.5.1 ANALYSES DU FUMIER . . . . . 262
6.5.2 ESSORAGE DU FUMIER . . . . . 263
6.5.2.1 Fonctionnement général et observations . . . . . 263
6.5.2.2 Analyses du fumier essoré et du liquide d'essorage . . 265
6.5.3 ESSAIS DE COMPOSTAGE EN RÉACTEUR . . . . . 268
6.5.3.1 Observation sur le fonctionnement mécanique du réacteur . . . . . 268
6.5.3.2 Déroulement des processus de compostage . . . . . 269
6.5.3.2.1 Oxygénation du compost . . . . . 269
6.5.3.2.2 Caractérisation des gaz à la sortie du réacteur . . . . . 269
6.5.3.2.3 Évolution des températures . . . . . 270
6.5.3.2.4 Évolution des masses et des volumes . . . . . 270
6.5.3.2.5 Évolution des caractéristiques des composts . . . . . 273
6.5.3.2.6 Bilan du compostage en réacteur . . . . . 274
6.5.3.2.7 Récupération de l'azote et de l'énergie . . . . . 275
6.5.4 ESSAIS DE COMPOSTAGE DANS L'ENTREPÔT À FUMIER SANS UTILISATION DES RÉACTEURS . . . . . 276
6.5.5 BILAN DE LA CHAÎNE DE GESTION PAR COMPOSTAGE . . . . . 280
6.5.5.1 Bilan du compostage en réacteur par rapport au fumier frais . . . . . 280
6.5.5.2 Bilan global de l'essorage et du compostage en réacteur par rapport au fumier frais . . . . . 282
6.5.5.3 Évaluation de la gestion par essorage/compostage des fumiers entièrement sous forme solide . . . . . 283
6.5.6 COÛTS D'UN RÉACTEUR À COMPOST . . . . . 284

6.6 DISCUSSION . . . . . 286
6.6.1 LITIÈRE . . . . . 286
6.6.2 ESSORAGE . . . . . 286
6.6.3 COMPOSTAGE . . . . . 287
6.6.4 CRITÈRES DE CONCEPTION VS RÉSULTATS OBTENUS . . . . . 289

6.7 CONCLUSION . . . . . 291

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES . . . . . 293

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page


**CHAPITRE 7 : RÉSUMÉ ET DISCUSSION GÉNÉRALE**

7.1 INTRODUCTION . . . . . 294

7.2 OBJECTIFS . . . . . 294

7.3 INTÉRETS DE LA GESTION PAR COMPOSTAGE . . . . . 295
7.3.1 AVANTAGES . . . . . 295
7.3.2 CONTRAINTES DU COMPOSTAGE . . . . . 299
7.3.2.1 Caractéristiques des fumiers et gestion par compostage 299
7.3.2.2 Production de lixiviats . . . . . 300
7.3.2.2.1 Volumes . . . . . 300
7.3.2.2.2 Caractéristiques des lixiviats . . . . . 300

7.4 **TECHNIQUES ÉTUDIÉES POUR RÉDUIRE LA PRODUCTION DE LIXIVIATS ET LES PERTES EN COURS DE COMPOSTAGE** . . . . . 303
7.4.1 UTILISATION DES LITIÈRES . . . . . 303
7.4.1.1 Coût de l'utilisation des litières . . . . . 304
7.4.2 ESSORAGE . . . . . 305
7.4.2.1 Essorage naturel . . . . . 306
7.4.2.2 Essorage mécanique . . . . . 306
7.4.3 COMPOSTAGE COUVERT OU NON COUVERT . . . . . 308
7.4.4 COMPOSTAGE EN RÉACTEUR À LA FERME . . . . . 309
7.4.5 COMPOSTAGE AVEC OU SANS RETOURNEMENT . . . . . 310

7.5 ACTIONS CORRECTIVES . . . . . 311
7.5.1 À L'ÉTABLE : Étape A . . . . . 311
7.5.2 À L'ENTREPOSAGE : Étape B . . . . . 312
7.5.3 AU COMPOSTAGE EN ANDAIN AU CHAMP : Étape C . . . . . 315
7.5.4 RÉSUMÉ DES ACTIONS CORRECTIVES À POSER À LA FERME . . 316

7.6 SCÉNARIOS DE COMPOSTAGE APPLICABLES À LA FERME LAITIÈRE . . 319
7.6.1 HYPOTHÈSES DE CALCULS POUR LES SCÉNARIOS DE COMPOSTAGE . . . . . 320
7.6.2 DESCRIPTION DES SCÉNARIOS DE COMPOSTAGE . . . . . 321

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

7.6.2.1 Scénario 1B). Utilisation massive de litière ..... 321
7.6.2.2 Scénario 2B). Essorage du fumier et utilisation du minimum de litière ..... 322
7.6.2.3 Scénarios 1A). Séparation des urines dans le dalot .. 325
7.6.2.4 Scénario 2A). Absorption complète des liquides au dalot ..... 327

7.7 DISCUSSION ..... 329

7.8 CONCLUSION ..... 332

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 334

## LISTE DES TABLEAUX


| | | Page |
|---|---|---|
| TABLEAU 1.1 : | CARACTÉRISTIQUES DES FUMIERS | 5 |
| TABLEAU 1.2 : | PARAMÈTRES ET CRITÈRES RECHERCHÉS POUR LES SUBSTRATS À COMPOSTER | 9 |
| TABLEAU 2.1 : | MASSES VOLUMIQUES APPARENTES ET TENEURS EN EAU INITIALES DES MATÉRIAUX | 38 |
| TABLEAU 2.2 : | TENEURS EN MATIÈRE ORGANIQUE ET RAPPORT C/N DES MATÉRIAUX | 39 |
| TABLEAU 2.3 : | pH ET CONCENTRATIONS EN ÉLÉMENTS FERTILISANTS MAJEURS DES MATÉRIAUX | 40 |
| TABLEAU 2.4 : | ABSORPTION EN EAU DES MATÉRIAUX EN FONCTION DU TEMPS | 42 |
| TABLEAU 2.5 : | CAPACITÉ D'ABSORPTION EN EAU DES MATÉRIAUX | 48 |
| TABLEAU 2.6 : | EFFET DE LA COMPRESSION SUR LES PERTES EN EAU DES MATÉRIAUX | 53 |
| TABLEAU 3.1 : | CAPACITÉ D'ABSORPTION EN EAU ET EN URINE | 67 |
| TABLEAU 3.2 : | RELATION ENTRE LES QUANTITÉS D'ABSORBANT ET LA TENEUR EN EAU DU FUMIER | 70 |
| TABLEAU 3.3 : | MASSE DE LITIÈRE REQUISE POUR AUGMENTER LE C/N DU FUMIER | 75 |
| TABLEAU 3.4 : | DESCRIPTION DES ESSAIS D'ABSORPTION DE LA PAILLE DANS LE DALOT | 77 |
| TABLEAU 3.5 : | VOLUME D'URINE NON ABSORBÉE APRÈS L'ÉCURAGE DU FUMIER | 80 |
| TABLEAU 3.6 : | VOLUME THÉORIQUE D'URINE ABSORBÉE PAR LA PAILLE D'AVOINE | 81 |
| TABLEAU 4.1 : | DESCRIPTION DES FUMIERS | 94 |
| TABLEAU 4.2 : | DESCRIPTION DES OPÉRATIONS EN COURS DE COMPOSTAGE | 96 |
| TABLEAU 4.3 : | CARACTÉRISTIQUES DES FUMIERS EN DÉBUT DE COMPOSTAGE | 102 |
| TABLEAU 4.4 : | ÉVOLUTION DES TENEURS EN OXYGÈNE DANS LES COMPOSTS EN COURS DE COMPOSTAGE | 106 |

## LISTE DES TABLEAUX (suite)


Page

TABLEAU 4.5 : ÉVOLUTION DES pH EN COURS DE COMPOSTAGE ..... 107
TABLEAU 4.6 : ÉVOLUTION DES CONDUCTIVITÉS ÉLECTRIQUES EN COURS DE COMPOSTAGE ..... 108
TABLEAU 4.7 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN EAU EN COURS DE COMPOSTAGE ..... 109
TABLEAU 4.8 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN MATIÈRE ORGANIQUE EN COURS DE COMPOSTAGE ..... 110
TABLEAU 4.9 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE TOTAL EN COURS DE COMPOSTAGE ..... 111
TABLEAU 4.10 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE AMMONIACAL EN COURS DE COMPOSTAGE ..... 112
TABLEAU 4.11 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE NITRIQUE EN COURS DE COMPOSTAGE ..... 113
TABLEAU 4.12 : ÉVOLUTION DES RAPPORTS C/N EN COURS DE COMPOSTAGE ..... 114
TABLEAU 4.13 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN PHOSPHORE TOTAL EN COURS DE COMPOSTAGE ..... 115
TABLEAU 4.14 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN POTASSIUM TOTAL EN COURS DE COMPOSTAGE ..... 116
TABLEAU 4.15 : MASSES ET TENEURS EN EAU DES FUMIERS ET DES COMPOSTS ..... 117
TABLEAU 4.16 : PERTES EN COURS DE COMPOSTAGE ..... 118
TABLEAU 4.17 : COÛTS DES ÉLÉMENTS FERTILISANTS ..... 124
TABLEAU 4.18 : VALEUR MONÉTAIRE DES PERTES EN ÉLÉMENTS MAJEURS OBTENUES LORS DU COMPOSTAGE ..... 125
TABLEAU 4.19 : VALEUR MONÉTAIRE À LA FERME DES PERTES EN ÉLÉMENTS MAJEURS OBTENUES LORS DU COMPOSTAGE ... 126
TABLEAU 4.20 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS DES FUMIERS EN DÉBUT DE COMPOSTAGE SUITE A LA MISE EN ANDAIN .. 127
TABLEAU 4.21 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS PRÉLEVÉS SOUS LES COMPOSTS COUVERTS (C1 ET C2) POUR LA DURÉE TOTALE DES ESSAIS ..... 128
TABLEAU 4.22 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS PRÉLEVÉS SOUS LES COMPOSTS NON COUVERTS APRÈS LES PRÉCIPITATIONS (C3 À C6) ..... 130

## LISTE DES TABLEAUX (suite)


Page

TABLEAU 4.23 : PARAMÈTRES DU BILAN D'EAU POUR LES TRAITEMENTS NON COUVERTS . . . . . 138
TABLEAU 4.24 : MASSE D'EAU CONSIDÉRÉE POUR LE BILAN DES TRAITEMENTS NON-COUVERTS . . . . . 142
TABLEAU 4.25 : BILAN MASSIQUE DE L'EAU POUR LES COMPOSTS COUVERTS . . . . . 144
TABLEAU 4.26 : CARACTÉRISTIQUES AGRONOMIQUES DES COMPOSTS . . 153
TABLEAU 4.27 : VALEUR MONÉTAIRE DES FUMIERS DE BOVINS LAITIERS NON COMPOSTÉS ET COMPOSTÉS . . . . . 155
TABLEAU 4.28 : VALEUR MONÉTAIRE DES FUMIERS DE BOVINS LAITIERS NON COMPOSTÉS ET COMPOSTÉS POUR UNE FERME MOYENNE . . . . . 156

TABLEAU 5.1 : DESCRIPTION DES SITES DE COMPOSTAGE . . . . . 171
TABLEAU 5.2a : DESCRIPTION DES ESSAIS DE COMPOSTAGE . . . . . 182
TABLEAU 5.2b : DESCRIPTION DES ESSAIS DE COMPOSTAGE (SUITE) . . . . 183
TABLEAU 5.3 : CARACTÉRISTIQUES DES FUMIERS . . . . . 185
TABLEAU 5.4a : VALEUR AGRONOMIQUE DES COMPOSTS . . . . . 189
TABLEAU 5.4b : VALEUR AGRONOMIQUE DES COMPOSTS . . . . . 190
TABLEAU 5.5 : PERTES EN COURS DE COMPOSTAGE À L'ANDAIN A7 AU CRIQ . . . . . 195
TABLEAU 5.6 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS ISSUS DES ANDAINS DE COMPOSTS À LA FERME B . . . . . 198
TABLEAU 5.7 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS ISSUS DES ANDAINS DE COMPOST À LA FERME C . . . . . 201
TABLEAU 5.8 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS ISSUS DES ANDAINS DE COMPOST À LA FERME IT . . . . . 203
TABLEAU 5.9 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS ISSUS DES ANDAINS DE COMPOST À LA FERME E . . . . . 207
TABLEAU 5.10 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS ISSUS DE L'ANDAIN DE COMPOST A7 AU CRIQ . . . . . 212
TABLEAU 5.11 : RÉSUMÉ DES VOLUMES DE LIXIVIATS PRODUITS LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE SUR LES FERMES ET SUR PLATE-FORME DE BÉTON . . . . . 218

## LISTE DES TABLEAUX (suite)


Page

TABLEAU 5.12 : CARACTÉRISTIQUES DES SOLS SOUS LES ANDAINS DE COMPOST . . . . . 224

TABLEAU 6.1 : CARACTÉRISTIQUES DU FUMIER FRAIS . . . . . 262
TABLEAU 6.2 : CARACTÉRISTIQUES DU FUMIER FRAIS, ESSORÉ ET DU LIQUIDE D'ESSORAGE . . . . . 265
TABLEAU 6.3 : PROPORTIONS MASSIQUES DU FUMIER ESSORÉ ET DU LIQUIDE D'ESSORAGE . . . . . 266
TABLEAU 6.4 : EFFETS DU COMPOSTAGE EN RÉACTEUR SUR LE VOLUME ET LA MASSE DU COMPOST . . . . . 271
TABLEAU 6.5 : ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DU COMPOST EN RÉACTEUR . . . . . 273
TABLEAU 6.6 : PERTES MASSIQUES DE LA COUCHE REPÈRE APRÈS 21 JOURS DE COMPOSTAGE EN RÉACTEUR . . . . . 275
TABLEAU 6.7 : ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DU COMPOST DANS L'ENTREPÔT . . . . . 277
TABLEAU 6.8 : VALEUR RÉSIDUELLE MASSIQUE PAR RAPPORT AU FUMIER FRAIS . . . . . 280
TABLEAU 6.9 : VALEUR RÉSIDUELLE DANS LE COMPOST ET LE LIQUIDE D'ESSORAGE PAR RAPPORT À L'ENSEMBLE DES FUMIERS DE LA FERME . . . . . 282
TABLEAU 6.10 : COÛTS DU SYSTÈME DE COMPOSTAGE EN RÉACTEUR . . 285

TABLEAU 7.1 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS . . . . . 302
TABLEAU 7.2 : COÛT D'UTILISATION DE LA PAILLE . . . . . 305
TABLEAU 7.3 : RÉSUMÉ D'ACTIONS CORRECTIVES A LA FERME POUR OPTIMISER LE COMPOSTAGE DES FUMIERS . . . . . 318
TABLEAU 7.4 : RÉSUMÉ DES SCÉNARIOS DE COMPOSTAGE. . . . . 330

# LISTE DES FIGURES


| | | Page |
|---|---|---|
| 1.1 | Schéma de la chaîne de gestion de fumiers de bovins laitiers | 2 |
| 1.2 | Processus de compostage et perte | 13 |
| 1.3 | Compostage et gestion des fumiers | 18 |
| 2.1 | Quantité d'eau absorbée effective en fonction du temps pour la TEE b.h. indiquée | 43 |
| 2.2 | Quantité d'eau absorbée effective en fonction du temps pour la TEE b.h. indiquée | 44 |
| 2.3 | Quantité d'eau absorbée effective en fonction du temps pour la TEE b.h. indiquée | 45 |
| 2.4 | Quantité d'eau absorbée effective en fonction du temps pour la TEE b.h. indiquée | 46 |
| 2.5 | Capacité d'absorption en eau en fonction de la teneur en eau | 49 |
| 2.6 | Capacité d'absorption en eau en fonction de la teneur en eau | 50 |
| 2.7 | Capacité d'absorption en eau en fonction de la teneur en eau | 51 |
| 2.8 | Capacité d'absorption en eau en fonction de la teneur en eau | 52 |
| 2.9 | Affaissement en fonction de la pression | 56 |
| 2.10 | Affaissement en fonction de la pression | 57 |
| 2.11 | Affaissement en fonction de la pression | 58 |
| 2.12 | Affaissement en fonction de la pression | 59 |
| 2.13 | Coût des absorbants humides en fonction du coût d'absorption en eau | 61 |
| 3.1 | Relation entre la porosité effective où du fumier non comprimé et la teneur en eau b.h. pour diverses quantités de paille | 73 |
| 3.2 | Schéma du système de récolte des liquides de dalot non absorbés | 78 |
| 4.1 | Vue d'ensemble du site d'essais | 89 |
| 4.2 | Schéma d'une plate-forme de compostage | 90 |
| 4.3 | Écoulement des lixiviats sur les piles de composts | 91 |
| 4.4 | Écoulement des lixiviats sur une plate-forme de compostage | 92 |

## LISTE DES FIGURES (suite)


| | | Page |
|---|---|---|
| 4.5 | Évolution des températures en cours de compostage | 103 |
| 4.6 | Évolution du volume des piles de compost en fonction du temps | 120 |
| 4.7a | Caractéristiques des lixiviats des composts non-couverts et retournée en fonction du temps | 133 |
| 4.7b | Caractéristiques des lixiviats des composts non-couverts et retournés en fonction du temps | 134 |
| 4.7c | Caractéristiques des lixiviats des composts non-couverts et retournés en fonction du temps | 135 |
| 4.8 | Volume de lixiviats récolté à la grille centrale et précipitation en cours de compostage | 140 |
| 4.9a | Charge cumulée en azote des lixiviats des composts non-couverts en fonction du temps de compostage | 150 |
| 4.9b | Charge cumulée en phosphore des lixiviats des composts non-couverts en fonction du temps de compostage | 151 |
| 4.9c | Charge cumulée en potassium des lixiviats des composts non-couverts en fonction du temps de compostage | 152 |
| 5.1 | Lysimètre installé à la ferme sous les andains de compost | 172 |
| 5.2 | Essais de compostage avec des listes absorbants et des toiles de recouvrement à la ferme E | 178 |
| 5.3 | Description du système d'entreposage à la ferme R. Allard | 179 |
| 5.4 | Évolution des températures et teneurs en oxygène en cours de compostage des composts de l'andain A7 du CRIQ et des plates-formes satellites de la ferme RA | 193 |
| 5.5 | Évolution des températures des composts de la ferme E | 194 |
| 5.6 | Évolution des volumes de lixiviats et des précipitations en fonction du temps de compostage à la ferme E | 205 |
| 5.7 | Évolution des volumes de lixiviats et des précipitations en fonction du temps de compostage pour les composts de la ferme RA | 209 |
| 5.8 | Évolution des volumes de lixiviats et des précipitations en fonction du temps de compostage pour le compost de l'andain A& du CRIQ | 211 |
| 5.9a | Caractéristiques des lixiviats de divers composts en fonction du temps de compostage | 214 |
| 5.9b | Caractéristiques des lixiviats de divers composts en fonction du temps de compostage | 215 |

## LISTE DES FIGURES (suite)


| | | Page |
|---|---|---|
| 5.9c | Caractéristiques des lixiviats de divers composts en fonction du temps de compostage | 216 |
| 5.10 | Évolution des teneurs en eau des divers composts en fonction du temps de compostage | 229 |
| 5.11 | Évolution des caractéristiques des composts pour divers traitements | 232 |
| 6.1 | Schéma d'ensemble de la ferme Berthely | 249 |
| 6.2 | Réacteurs à compost | 251 |
| 6.3 | Diagramme d'écoulement du fumier | 254 |
| 6.4 | Séquence d'opération des deux réacteurs à compost | 255 |
| 6.5 | Disposition des thermocouples dans un réacteur | 257 |
| 6.6 | Points d'échantillonnage de la couche de compost dans le réacteur | 260 |
| 6.7 | Températures du compost danas le réacteur et de l'air extérieur | 272 |
| 6.8 | Température du compost en tas dans l'entrepôt | 278 |
| 6.9 | Bilan global de la chaîne de gestion des fumiers à la ferme Berthely | 281 |
| 7.1 | Scénario 1B). Utilisation massive de litière | 323 |
| 7.2 | Scénario 2B). Essorage mécanique du fumier | 324 |
| 7.3 | Scénario 1A). Séparation des urines dans le dalot | 326 |
| 7.4 | Scénario 2A). Absorption complète des liquides au dalot | 328 |

# CHAPITRE 1 : NOTIONS DE BASE SUR LE COMPOSTAGE DES FUMIERS DE BOVINS LAITIERS À LA FERME

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

## 1.1 INTRODUCTION

Depuis quelques années, le compostage du fumier de bovins laitiers à la ferme fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et de démonstration. Plusieurs articles et rapports traitant du compostage sont déjà disponibles. Au-delà des résultats obtenus à ce jour, on constate qu'il existe toujours une certaine ambiguïté sur la définition des termes ainsi que sur les objectifs poursuivis par cette pratique. Avant de présenter les résultats des essais, il nous est apparu important de faire un rappel sur certains aspects concernant le compostage du fumier de bovins laitiers. L'objectif du présent chapitre consiste à mettre en lumière certaines notions de base qui ont guidé et orienté les divers travaux entrepris dans le cadre du présent projet de recherche.

## 1.2 CONTEXTE DE LA FERME LAITIÈRE

En 1987, le Québec comptait 15 800 fermes de bovins laitiers générant annuellement 80 % des déjections bovines produites au Québec, soit 13 350 000 $m^3$ de déjections par an (BIOREX, 1989). On estime à près de 400, le nombre d'entreprises qui quittent la production laitière chaque année (BIOREX, 1989). À la ferme laitière, les vaches vont à l'extérieur en moyenne 125 jours/année et la production de déjections au pâturage n'est pas incluse comme telle dans la gestion des fumiers (BIOREX, 1989).

En général, les caractéristiques du fumier des entreprises laitières sont influencées par la quantité de litière ajoutée au fumier, les équipements d'évacuation et la structure d'entreposage en place. La quantité moyenne de litière utilisée à l'étable serait de 2,1 kg/vache laitière-j sur les fermes laitières québécoises (BIOREX, 1989). Selon Robert (1994), «on retrouve dans l'amas de fumier d'une ferme laitière moyenne, une quantité d'azote, de phosphore et de potassium d'une valeur équivalente à 8 300 $, qui n'est à peu près pas utilisée actuellement».

### 1.2.1 GESTION DES FUMIERS

La gestion des fumiers sur la ferme laitière québécoise se réalise de différentes façons. Le schéma de la chaîne de gestion du fumier de bovins laitiers est présenté à la figure 1.1. Pour les vaches laitières à stabulation entravée, les fèces et l'urine produites tombent en grande partie dans un dalot de béton d'environ 30 cm de largeur et 25 cm de profondeur situé derrière les animaux.

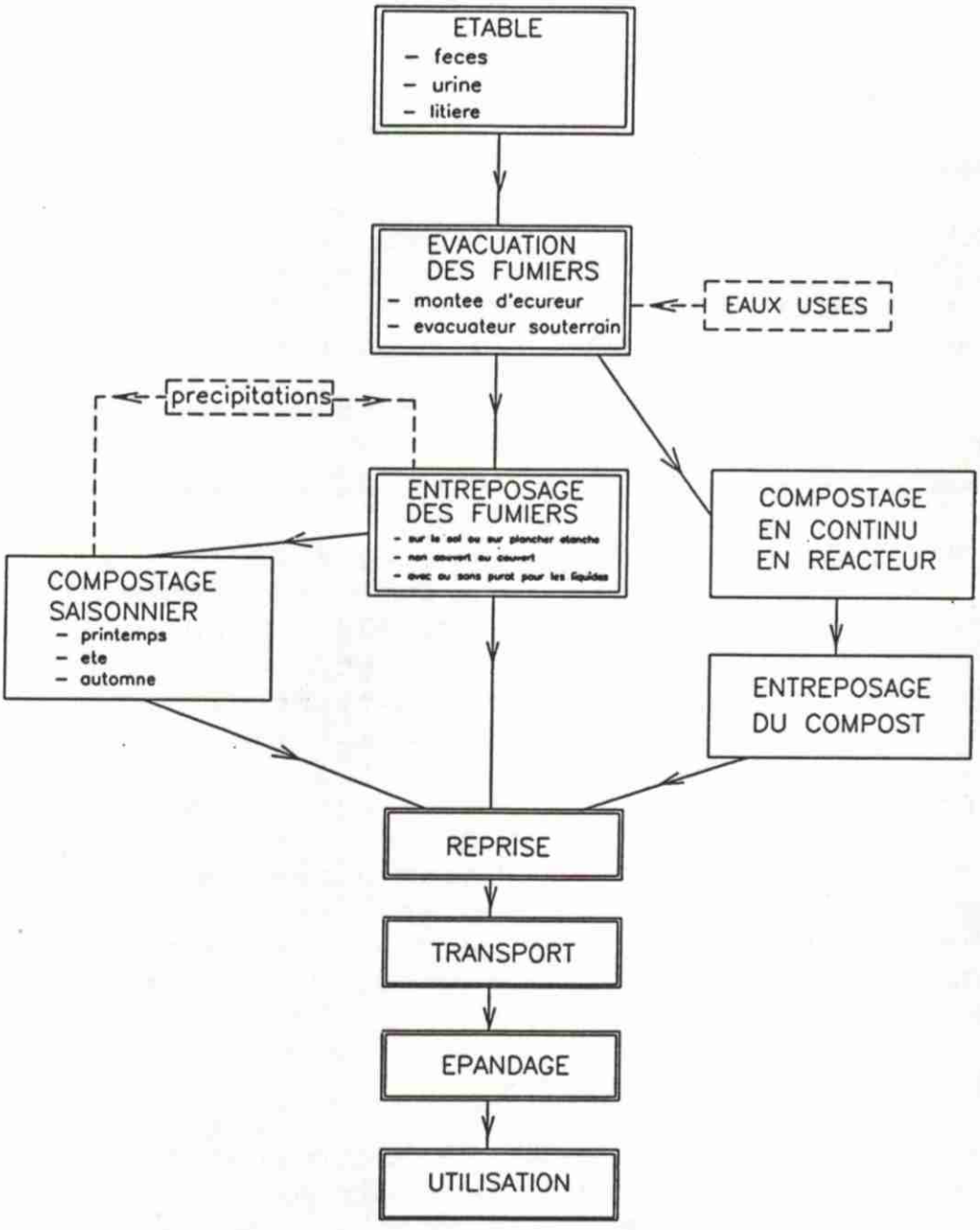



**Figure 1.1 : Schéma de la chaîne de gestion des fumiers de bovins laitiers**

#### 1.2.1.1 Évacuation du fumier

Le fumier est acheminé sur une aire d'entreposage au moyen d'une montée d'écureur (64,5 % des fermes), d'évacuateurs à piston (20 % des fermes) ou d'évacuateurs pneumatiques (10 % des fermes) (BIOREX, 1989). Par contre, la proportion des entreprises possédant un évacuateur souterrain augmente avec la taille de l'entreprise; les évacuateurs souterrains sont dominants chez les entreprises de plus de 50 vaches (BIOREX, 1989).

Pour les systèmes avec évacuateur souterrain (à piston ou à pression d'air), la quantité de litière à appliquer à l'étable est limitée par la consistance du fumier qui ne doit pas entraver le bon fonctionnement de ce type d'équipement. Selon BIOREX (1989), la quantité maximale de litière serait de 3,8 et 2,7 kg/u.a.-j respectivement pour l'évacuateur pneumatique et à piston. Une quantité de 4,2 kg/u.a.-j de litière serait utilisable avec les systèmes de montée d'écureur (BIOREX, 1989).

#### 1.2.1.2 Entreposage du fumier

Au Québec en 1989, seulement 32,8 % des entreprises laitières possédaient une structure d'entreposage plus ou moins étanche (BIOREX, 1989). Cependant, le nombre d'entreprises possédant une structure d'entreposage des fumiers est à la hausse notamment depuis l'implantation du PAAGF (Programme d'aide et d'amélioration à la gestion des fumiers, volet aide financière aux producteurs) du Gouvernement du Québec.

À la ferme, les structures suivantes se retrouvent pour l'entreposage des fumiers : entrepôts à fumier couverts, structures d'entreposage non couvertes, avec ou sans plancher de béton, avec ou sans muret pour retenir la fraction liquide et avec ou sans purot pour l'entreposage des liquides.

Pour les systèmes d'entreposage qui n'ont pas de toiture, les précipitations intenses peuvent saturer le fumier en eau. La saturation du tas de fumier et la compression par l'empilement, occasionnent l'écoulement du purin à la base du tas de fumier. La proportion de purin à entreposer sur des fermes avec systèmes d'entreposage sans toiture (les précipitations sont alors récoltées dans la fosse) représente 37 % du volume de fumier à entreposer (BPR, 1993). Pour les entrepôts couverts, le volume de purin non absorbé qui s'écoule du tas de fumier sous la montée d'écureur serait de 20 à 25 % du volume de fumier à entreposer (CPVQ, 1992).

### 1.2.1.3 Compostage du fumier

Comme il est illustré à la figure 1.1, le compostage saisonnier du fumier constitue une étape supplémentaire à la chaîne de gestion conventionnelle du fumier de bovins laitiers. Cette étape additionnelle s'imbrique entre l'entreposage du fumier et sa reprise pour l'épandage aux champs. Il est également envisageable d'éliminer l'entreposage du fumier en utilisant une technique de compostage en continu lorsque le fumier est acheminé rapidement de l'étable au site de compostage et ce, quotidiennement et durant toute l'année. Cette dernière approche n'élimine cependant pas la nécessité d'entreposer le compost avant sa reprise.

Les équipements, le temps et la main-d'oeuvre requis pour le compostage doivent se justifier par l'obtention de gains qui sont d'ordre agronomique, environnemental et/ou économique. Cependant, pour certains producteurs agricoles, le choix du compostage reposera sur d'autres considérations (agriculture écologique, etc.).

### 1.2.1.4 Caractéristiques du fumier de bovins laitiers

Des quantités variables de litières sont ajoutées aux déjections à l'étable. Le mélange des trois fractions (fèces, urine et litière) est appelé fumier. La production quotidienne de déjections est variable selon l'âge, le poids, l'alimentation, la consommation d'eau, etc. (BIOREX, 1989). Un constat similaire s'applique à la proportion fèces/urine des déjections.

Il importe de souligner que l'analyse des fumiers de bovins laitiers à l'étable et à l'entreposage peut révéler des différences importantes concernant les caractéristiques des fumiers. Robert (1992) présente une teneur en eau moyenne du fumier de bovin avec paille de 74,6 % avec des valeurs minimales et maximales de 29,1 et 97,6 %; cette moyenne est établie à partir d'une centaine de fumiers différents.

Les résultats présentés par Antoun (1983) indiquent également des teneurs en eau élevées pour ce type de fumier, soit de 79,9 % avec un écart type de 0,55 %. Ces valeurs s'appuient sur un échantillonnage de plus de 98 amas de fumier effectué sur des fermes laitières québécoises.

Le rapport C/N moyen du fumier de bovin avec paille serait d'environ 14 selon Robert (1992), avec des valeurs maximales inférieures à 30. Les analyses des fumiers faites par Antoun (1983) et Robert (1992) sont présentées au tableau 1.1.

## TABLEAU 1.1 : CARACTÉRISTIQUES DES FUMIERS

| Fumier de bovin laitier | Nbr éch. | TEE b.h. (%) | Ntot (kg/tonne) | $P_2O_5$ (kg/tonne) | $K_2O$ (kg/tonne) | C/N | MO (kg/tonne) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Robert (1992) | 109 | 74,6 | 5,46 - 5,56 | 3,87 - 4,35 | 4,85 - 5,36 | 14,2 | 133 - 268 |
| Antoun (1983) | 98 | 79,9 | 4,0 - 4,5 | 2,5 - 3,0 | 4,0 - 4,9 | 21,9 | 171 |

À défaut de données précises sur la quantité et les caractéristiques du fumier de bovins laitiers, les hypothèses suivantes sont retenues pour les divers calculs présentés dans ce rapport.

La masse quotidienne de déjections produite par une vache laitière de 550 kg serait de 49 L et la masse volumique apparente des déjections animales est de 1 007 kg/m$^3$ ce qui correspond à une production de déjections de 49 kg/u.a.-j (CREAQ, 1988). À la lumière des informations disponibles, la proportion volumique fèces/urine est établie à 75/25 (BPR, 1992). Donc, la production quotidienne d'urine est évaluée à 12,25 L/u.a.-j (12,25 kg/u.a.-j) et celle des fèces à 36,75 kg/u.a.-j. Les teneurs en eau de l'urine et des fèces ont été mesurées à respectivement 95 et 84 % par le CRIQ.

À partir des analyses de fèces et d'urine réalisées au CRIQ, la teneur en eau b.h. des déjections (urine/fèces) est calculée à 87 %. De ces mêmes analyses, on estime la teneur en matière organique des déjections (fèces+urine) sur base sèche à 83 % et la teneur en azote b.s. à 3,55 %. On obtient ainsi un rapport C/N des déjections de 13,5.

Dans le cadre de ce travail, les caractéristiques des déjections à l'étable servent aux calculs des quantités de litières à ajouter pour augmenter le rapport C/N et diminuer l'humidité du fumier. Pour les essais de compostage des fumiers, les caractéristiques du fumier à l'entreposage constituent le point de référence lorsque l'on compare ces valeurs à celles obtenues après le compostage.

# 1.3 NOTIONS DE BASE SUR LE COMPOSTAGE

## 1.3.1 DÉFINITION DU COMPOSTAGE ET DU COMPOST

Il existe de nombreuses définitions relativement aux termes compostage et compost. Le premier réfère au procédé de fabrication, le second au produit qui en découle. Si dans le passé ces deux termes ont parfois été utilisés de façon confuse et abusive, les futurs règlements et normes devront s'appuyer sur des définitions claires et précises.

En matière de définitions, les travaux du Groupe spécialisé sur le compostage de la Commission des communautés européennes apparaissent particulièrement intéressants (De Bertoldi et Zucconi, 1986). Selon eux :

**Le compostage désigne un procédé de biooxydation contrôlé qui :**

- **implique un substrat organique hétérogène solide;**
- **évolue en passant par une phase thermophile et une libération temporaire de phytotoxines;**
- **conduit à la production de dioxyde de carbone, d'eau, de minéraux et de matière organique stabilisée (compost).**

L'emploi des termes «procédé... contrôlé» permet de distinguer le compostage des processus naturels de décomposition qui se déroulent aléatoirement dans la nature. La température, l'oxygénation, l'humidité et la composition du substrat sont contrôlées dans le but de maximiser le travail des microorganismes, de réduire le temps de compostage et d'hygiéniser le compost.

Le terme «biooxydation» permet de distinguer le compostage des traitements physiques et chimiques tout en excluant les processus anaérobies. Les produits issus de procédés de traitements par fermentation ou digestion anaérobie devraient être désignés sous une appellation autre que le terme compost.

Le terme compost devrait s'utiliser pour désigner exclusivement **le produit du compostage stabilisé et hygiénisé qui est bénéfique à la croissance des plantes. Il a subi une première étape de décomposition rapide et est en cours d'humidification.**

Les processus d'oxydation biologique sont exothermiques et la production de chaleur doit être considérée comme une condition unique qui caractérise le compostage. Par définition, la phase thermophile est atteinte lorsque la température dans la masse dépasse 45 °C.

Le terme «stabilisé» implique que la stabilisation doit être réalisée par les processus biologiques eux-mêmes et non par une stérilisation supplémentaire et/ou une dessiccation.

Le terme «hygiénisé» réfère à la destruction des pathogènes qui résulte de l'effet combiné des hautes températures et de la compétition microbienne et non de la stérilisation ou de la pasteurisation artificielle. Le maintien des températures à 55-60 °C pendant quelques jours suffirait pour éliminer les pathogènes des végétaux ainsi que les nématodes.

En dépit de ces efforts de concision, il arrive qu'en pratique les termes employés pour désigner le compostage à la ferme soient encore utilisés de façon abusive puisque les exigences pour l'appellation «compostage» ne sont pas toujours rencontrées. Il est difficile d'établir de façon rigoureuse la distinction précise entre le compostage en andain sans retournement et l'entreposage en tas ou en andain au champ; les opérations et les processus en cause étant en pratique similaires dans les deux cas.

### 1.3.2 OBJECTIFS DU COMPOSTAGE

De façon générale, l'attrait et la promotion du compostage reposent sur l'aptitude du compostage à rencontrer à la fois des objectifs de traitement de résidus et des objectifs de production d'un amendement organique (compost). La littérature existante fait état des nombreux avantages attribués à la fois au procédé de compostage et aux composts.

Sur les fermes opérant en mode biologique et pour celles qui sont en transition, le compost s'inscrit comme une composante majeure dans l'amélioration et le maintien de la fertilité des sols. Sur les fermes laitières conventionnelles, le compostage s'inscrit davantage comme un mode de gestion de la fraction solide des fumiers qui, à l'instar des autres solutions, comporte un certain nombre d'avantages mais aussi d'inconvénients. Parmi une liste exhaustive d'avantages liés à cette filière, plusieurs des arguments véhiculés sont difficiles à mesurer et à quantifier de sorte qu'il est, à toute fin pratique, difficile actuellement de quantifier l'ensemble des bénéfices économiques du procédé ou du produit. Citons à titre d'exemple, le coût de la

matière organique et de certains de ses effets comme l'activité biologique des sols, l'hygiénisation du fumier, l'épandage uniforme et la flexibilité d'utilisation du compost, la qualité de l'humus, l'effet du compost sur la qualité des aliments, l'absence de mauvaises odeurs à l'épandage du compost, etc. Pourtant, dans le contexte pratique de la ferme laitière, certains de ces arguments s'avèrent tout aussi importants que les effets quantifiables.

#### 1.3.2.1 Avantages du compostage du fumier

Les avantages suivants font partie des objectifs habituellement poursuivis par ceux qui pratiquent le compostage des fumiers à la ferme :

- réduction du volume et de la masse de fumier à épandre;
- destruction des pathogènes, des parasites et des mauvaises herbes;
- stabilisation de l'azote;
- stabilisation de la matière organique;
- désodorisation du fumier;
- réduction de la teneur en eau par évaporation.

#### 1.3.2.2 Inconvénients du compostage

Par contre, il nous apparaît tout aussi important de présenter les inconvénients reliés au compostage des fumiers :

- exige une quantité importante de paille ou une technique de réduction de la teneur en eau du fumier;
- requiert du temps supplémentaire pour les opérations de compostage;
- exige du savoir-faire et une formation de base;
- entraîne une production de lixiviats en cours de compostage qui doivent être gérés adéquatement (pertes d'éléments fertilisants et charge polluante pour l'environnement);
- entraîne des pertes d'azote et de potassium significatives en cours de compostage.

Le compost est un amendement organique destiné à fournir de la matière organique stabilisée aux sols. Les effets bénéfiques des composts sont donc liés à leur contenu en matière organique et en humus. Quoique non négligeable, l'apport d'éléments fertilisants (majeurs, secondaires et mineurs) des composts apparaît secondaire. Le

producteur agricole qui évalue les intérêts du compostage doit considérer les gains agronomiques résultant de l'application des composts (effets sur les propriétés du sol et sur la croissance des végétaux).

Il faut toutefois noter que ce dernier point ne s'inscrit pas dans les objectifs des travaux de compostage réalisés par le CRIQ. Certains projets actuellement en cours au Québec, couvrent les effets des composts sur les caractéristiques des sols et sur la croissance des végétaux.

### 1.3.3 PARAMÈTRES DU COMPOSTAGE ET VALEURS RECHERCHÉES

Le compostage est essentiellement basé sur l'action des microorganismes qui transforment et stabilisent les matières organiques fraîches du substrat à composter. L'optimisation de l'activité microbiologique est rendue possible lorsque les conditions de vie des microorganismes sont rencontrées et maintenues lors du compostage. Les paramètres physiques, chimiques et biologiques qui influencent le travail des microorganismes sont appelés «paramètres du compostage». Les principaux paramètres de compostage ainsi que les valeurs recherchées sont présentés au tableau 1.2. La littérature existante fait état des principaux paramètres suivants :

**TABLEAU 1.2 PARAMÈTRES ET CRITÈRES RECHERCHÉS POUR LES SUBSTRATS À COMPOSTER**

| Paramètres | Critères | Remarques |
|---|---|---|
| Teneur en eau | 40 - 65 % (b.h.) | |
| Espace lacunaire | 30 - 36 % (vol.) | Macroporosité |
| Rapport C/N | 30 - 50 | |
| Teneur en oxygène dans le compost | > 5 % (vol.) | |
| Température | 50 - 55 °C<br>> 55 °C | Processus biologiques<br>Hygiénisation |
| pH | 5,5 - 8,0 | |

### 1.3.3.1 Teneur en eau (humidité) et espace lacunaire (porosité effective)

D'un point de vue biologique, une teneur en eau élevée du compost ne serait pas limitative si l'oxygénation du substrat pouvait être satisfaite. En pratique cependant, le niveau d'humidité optimal est plus bas, afin de permettre l'oxygénation passive ou mécanique du compost.

La valeur d'humidité optimale habituellement recherchée pour les composts se situe entre 40 et 65 % selon divers auteurs (Bell et al. (1973), McGauhey et Golueke (1953), Hoitink et Poole (1979), Pos (1990)). Un excès d'eau dans le compost conduit à des conditions d'anaérobiose dans le substrat et à la production d'odeurs nauséabondes habituellement associées à cette condition. La production de lixiviats est également à craindre et constitue de plus, une perte en éléments nutritifs et une charge polluante pour l'environnement. Avec le fumier de vaches laitières, une teneur en eau du fumier excédant 75 % risque de ne jamais engendrer des températures thermophiles dans le compost (Taiganides, 1977).

L'humidité optimale pour un matériel à composter est déterminée par le taux maximal d'espace lacunaire qui n'entraîne pas d'inhibition de l'activité microbienne (Mustin, 1987). La structure du matériel à composter détermine donc la valeur optimale d'humidité. Pour la plupart des substrats à composter, le compostage optimal dans les premières phases serait obtenu pour des pourcentages volumiques variant de 30 à 36 % d'espaces lacunaires (volume occupé par l'air/volume total du compost) dans la masse humide (Mustin, 1987). Pour un compost d'ordures ménagères, la teneur en eau correspondant à ces valeurs d'espaces lacunaires varie de 61 à 65 % (Jeris, 1973).

### 1.3.3.2 Rapport C/N

Le rapport C/N optimal recherché varie selon les auteurs mais demeure généralement dans le même ordre de grandeur soit environ 30. Du point de la physiologie microbienne, des valeurs de C/N variant entre 30 et 50 sont considérées optimales selon Taiganides (1977). On doit cependant prendre en considération la nature du carbone et de l'azote qui détermine en partie, la disponibilité de ces éléments pour la flore microbienne. Des valeurs supérieures à 50 ralentissent les processus du compostage (Taiganides, 1977). Généralement, des concentrations en azote total excédant 1,5 à 2,5 % sont suffisamment élevées pour un compostage adéquat (Taiganides, 1977).

Des valeurs de C/N inférieures à 30 conduisent à des pertes d'azote ammoniacal par volatisation. En effet, Kirchman (1988) établit le rapport C/N optimal pour limiter les pertes d'azote des fumiers à plus de 30.

Le rapport N/P (azote total/phosphore total) optimal pour le compostage est compris entre 2 et 5 selon Mustin (1987).

#### 1.3.3.3 Teneur en oxygène (oxygénation)

Selon Hoitink et Poole (1979), la concentration en oxygène dans les espaces lacunaires de la masse de compost devrait se situer au-dessus de 0,1 % et entre 8 et 12 % idéalement pour favoriser une biodégradation accélérée. Pour le fumier de vaches laitières, l'air du compost devrait contenir au moins 5 % en volume d'oxygène résiduel (Taiganides, 1977). Lorsque le niveau d'oxygène dans les espaces lacunaires du compost descend sous 2 %, le compost doit être oxygéné (Taiganides, 1977). Les objectifs de l'oxygénation sont traités en détail au chapitre 6.

#### 1.3.3.4 Température

Les températures optimales recherchées dans le compost se situent entre 50 et 55 °C (Golueke, 1976 et Finstein, 1980). Cependant, pour la destruction des organismes pathogènes, des températures comprises entre 50 et 60 °C seraient souhaitables et mêmes exigées dans certains pays. Toutefois, les températures du compost ne devraient pas excéder 70 °C durant le compostage; à cette température l'activité des microorganismes seraient négligeables (Golueke, 1991). Des températures thermophiles devraient toujours être recherchées en cours de compostage parce que certains microorganismes travaillent de façon optimale à des températures appartenant à la zone thermophile (entre 45 °C et 75 °C). De plus, il apparaît «questionnable» d'attribuer au compostage l'effet de destruction des pathogènes et des graines de mauvaises herbes lorsque les températures thermophiles ne sont pas atteintes. Une bonne technique de compostage doit permettre à l'ensemble de la masse de rencontrer ces conditions de température. Dans le cas contraire, les effets bénéfiques recherchés ne seront que partiellement atteints.

#### 1.3.3.5 pH

La zone optimale de pH pour les bactéries dans le compost (cellulolytiques) serait comprise en 6,0 et 7,5 et celle des moisissures entre 5,5 et 8,0 (Golueke, 1991). En pratique, la zone de pH admissible pour les microorganismes en cours de compostage est large et s'étendrait de 4,5 à 9,0 (Golueke, 1991). Le pH en cours de compostage peut également être considéré en regard des pertes d'azote par volatilisation. Besson et al (1982), remarque des risques élevés de dégagement ammoniacal des fumiers à des pH de plus de 8,2.

### 1.3.4 PROCESSUS DE TRANSFORMATION ET DE PERTES LORS DU COMPOSTAGE

Le compostage comprend à la fois des processus de dégradation (décomposition des débris initiaux liée à la synthèse des cellules microbiennes) et de synthèse (production d'humus) (Kaiser, 1983). Lors du compostage du fumier, la matière organique fraîche est transformée par l'action des micro-organismes du compost. Ceux-ci comprennent les champignons, les actinomycètes et les bactéries mésophiles et thermophiles dont les espèces se succèdent dans le temps. Ces organismes sont responsables, à eux seuls, de plus de 95 % de cette activité (Mustin, 1987).

D'une part, les caractéristiques physiques et chimiques du matériel de départ sélectionnent une microflore qui va complètement modifier l'environnement initial. De par leur activité, les microorganismes du compost créent, à un moment donné, les conditions de leur propre destruction qui se trouvent être optimales pour les populations suivantes (Mustin, 1987).

D'autre part, les caractéristiques du matériel de départ influencent fortement les processus de dégradation. Les organismes cellulolytiques, pectinolytiques, protéolytiques, etc. présents dans le compost vont dégrader les divers composés carbonés et azotés (Kaiser, 1983).

La figure 1.2 illustre les principaux processus de transformation de la matière organique et de pertes en éléments majeurs qui se produisent à des intensités variables lors du compostage du fumier.

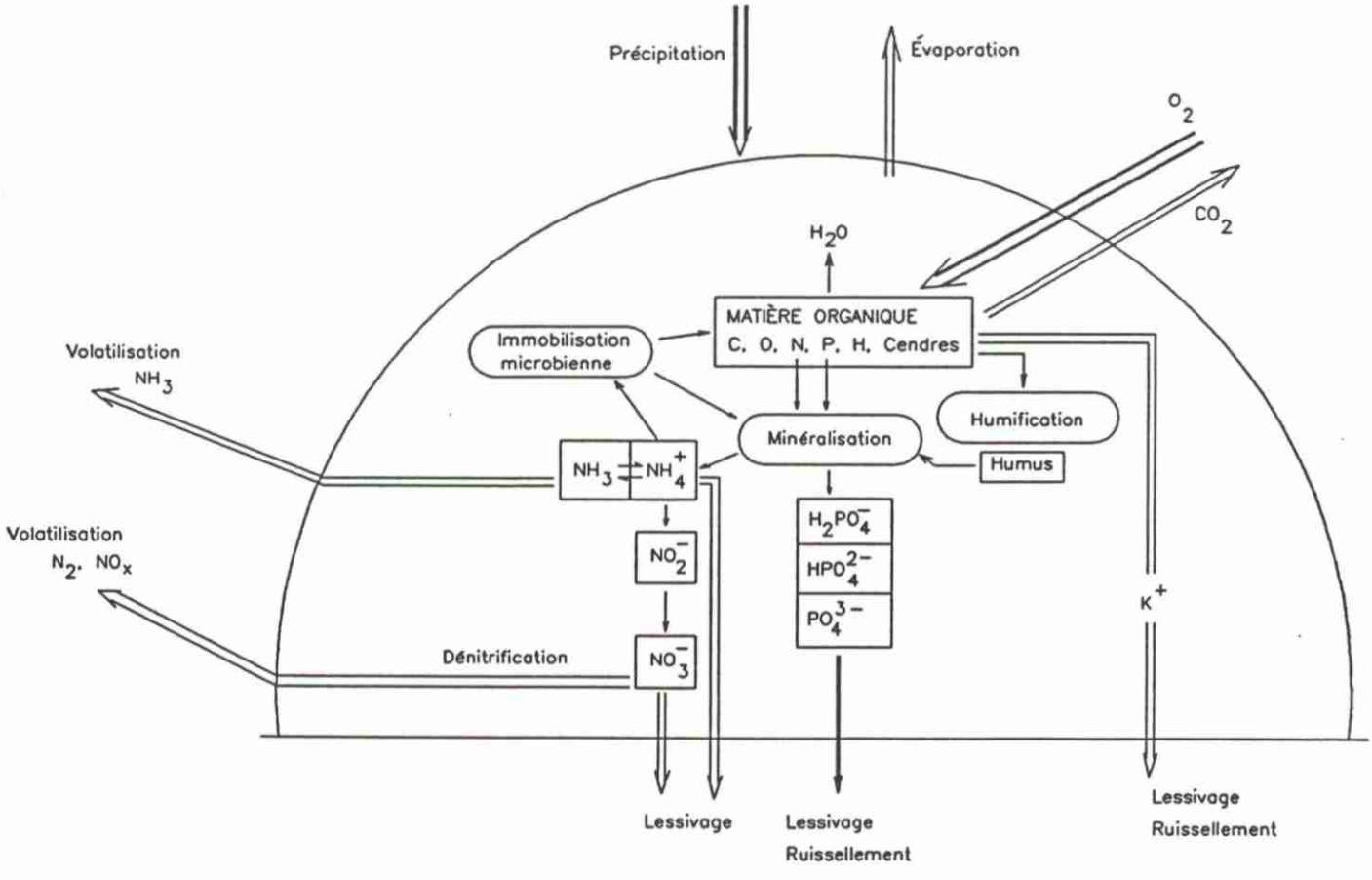



**Figure 1.2 : Processus de compostage et perte**

### 1.3.4.1 Matière organique

La matière organique est transformée par l'activité microbienne en composés plus simples. Les produits de la décomposition sont essentiellement le $CO_2$, l'eau, la masse microbienne, certains composés organiques transitoires, l'humus et la chaleur. La nature et l'intensité des processus de transformation de la matière organique varient selon les conditions d'anaérobiose ou d'aérobiose qui prévalent au sein de la masse.

En présence d'oxygène (compostage), l'azote disponible est immobilisé sous forme de protéine dans les cellules microbiennes et une fraction du carbone est respirée et relâchée en $CO_2$. Selon Kaiser (1983), environ le tiers du carbone est assimilé par les cellules microbiennes et les deux tiers dégagés sous forme de $CO_2$. La perte de matière organique en $CO_2$ est donc inévitable. En moyenne, la perte de matière organique après le compostage, pour un rapport C/N de départ optimal, varie entre 35 et 50 % (Mustin, 1987). Des valeurs de C/N élevées (> 35) ralentissent la décomposition des matières organiques (Kaiser, 1983).

Lors de la maturation du compost, la matière organique se stabilise et s'humidifie. La lignine, les huiles, les résines et les graisses sont transformées lentement en humus et en $CO_2$.

### 1.3.4.2 Azote

Au départ, l'azote contenu dans les déjections est à 50 % sous la forme d'urée (dans l'urine) ou est liée à la matière organique (dans les fèces) (BIOREX, 1989). L'urée est rapidement transformée en ions ammonium ($NH_4^+$) et la réaction entraîne une élévation de pH du compost. Selon le pH du milieu, les formes $NH_4^+$ ou $NH_3$ seront plus ou moins importantes. Un pH élevé du milieu et la ventilation du compost sont favorables à la volatilisation de l'ammoniac. L'anaérobiose et l'acidité du milieu qui en découle sont au contraire favorables à la conservation de l'azote ammoniacal.

L'immobilisation et la minéralisation de l'azote sont des processus qui peuvent se produire simultanément. D'une part, les microorganismes assimilent rapidement l'azote ammoniacal présent et l'immobilisent dans leur cellule sous forme de protéines (Danneberg, 1971). Les microflores se succédant, les protéines accumulées par les premières serviront d'azote aux secondes.

D'autre part, lorsque le rapport C/N initial du matériel à composter est bas (environ 8), la minéralisation de l'azote l'emporte sur l'immobilisation (Kaiser, 1983). Conséquemment, on observe une accumulation de l'azote minéral dans le compost. Une trop grande accumulation en azote minéral dans le matériel peut conduire à des pertes d'azote ammoniacal ($NH_3$) par volatilisation (pH>8,5). En condition aérobie, une partie de l'azote ammoniacal est nitrifiée par les bactéries de la nitrification et conduit à la production successive de nitrites et de nitrates. En absence d'oxygène, des pertes d'azote peuvent se produire par dénitrification de l'azote nitrique ($NO_3$) en $N_2$ ou $NO_x$. L'azote est également perdu par le lessivage des nitrates (Kaiser, 1983).

#### 1.3.4.3 Phosphore

Le phosphore des déjections provient presque entièrement des fèces et plus de 75 % se retrouve sous une forme inorganique (BIOREX, 1989). Le phosphore est peu mobile et beaucoup moins susceptible au lessivage que l'azote (BPR, 1989). Les microorganismes (bactéries et champignons) dits «solubilisateurs de phosphore» assimilent le phosphore minéral insoluble pour le transformer en phosphate organique dans leurs cellules. Ils relarguent également du phosphore soluble dans le milieu environnant (Mustin, 1987).

La principale cause des pertes de phosphore dans la chaîne de gestion des fumiers est le ruissellement des formes organiques et inorganiques en solution dans les liquides non liés à la litière (BIOREX, 1989).

#### 1.3.4.4 Potassium

Le potassium des déjections est entièrement sous la forme minérale (BIOREX, 1989). Il provient principalement de l'urine. De par sa mobilité, le potassium est sujet au lessivage et le ruissellement peut être une cause importante de pertes (BIOREX, 1989).

## 1.4 COMPOSTAGE DES FUMIERS À LA FERME

Après avoir présenté les caractéristiques du fumier de bovins laitiers et revu les paramètres du compostage ainsi que les principaux processus des pertes, le compostage du fumier de bovins laitiers dans le contexte particulier de la ferme laitière est présenté.

### 1.4.1 CONTEXTE

Au Québec, le compostage se pratique sur plus de 600 fermes dont près de la moitié sur les entreprises agricoles laitières (Robitaille, 1994). Le compostage en andains du fumier constitue la technique couramment pratiquée au Québec. La moitié des producteurs qui pratiquent le compostage confectionnent les andains lors de la reprise printanière à partir du fumier accumulé (Robitaille 1994).

L'andain forme un tas allongé d'une hauteur approximative de 1,5 mètre et d'une largeur d'environ 3 mètres. La longueur varie en fonction de la quantité de fumier à composter. Les dimensions de l'andain (hauteur et largeur) sont limitées par la configuration des équipements existants et spécialement conçus pour les opérations de retournements du compost. La confection de l'andain se fait habituellement à l'aide de l'épandeur à fumier dans 62 % des cas (Robitaille, 1994). Les autres équipements utilisés pour cette opération sont le camion ou la benne basculante.

Les retournements du compost sont effectués au cours de la période estivale. La fréquence et le nombre de retournements sont variables et apparaissent davantage basés sur des considérations pratiques (climat, disponibilité des équipements, disponibilité de la main-d'oeuvre) plutôt que sur des critères précis de contrôle du procédé (température et teneur en oxygène du compost, développement de la microflore, évolution de la matière organique). Selon Robitaille (1994), un tiers seulement des entreprises brassent tout le tas en compostage. Le plus souvent, la pelle du chargeur ou le retourneur servent à brasser le compost. Le coût des retourneurs d'andains disponibles sur le marché québécois et principalement utilisés à la ferme se situerait entre 10 000 - 30 000 $.

Les trois quarts des producteurs utilisent un compost dont l'âge est de moins de six mois (Robitaille, 1994). L'absence d'odeurs désagréables du compost permet, selon Robitaille (1994), de l'épandre régulièrement durant la saison, sans diminuer l'appétence des fourrages pour les animaux et sans encourir les foudres des citadins ou des touristes.

Plusieurs projets de recherche et de démonstration ont été réalisés au cours des dernières années sur le compostage du fumier de bovins laitiers. Certains visent à optimiser les paramètres de compostage afin de minimiser les pertes d'azote et de potassium encourues lors du compostage par l'utilisation d'additifs et l'ajout de quantités de litière variables dans le fumier. D'autres projets portent sur des méthodes innovatrices de compostage (compostage en continu au champ, compostage sous abri, recouvrement des andains de compost à l'aide de toiles et compostage sous

aération forcée). Bien que le compostage en réacteur et en continu à la ferme suscite un vif intérêt, il n'existe pas à notre connaissance, d'entreprises agricoles qui utilisent de tels systèmes actuellement. Le compostage du fumier par aération forcée fait, depuis quelques années, l'objet de recherche à l'ITA de La Pocatière (L'Heureux, 1993).

### 1.4.2 PROBLÉMATIQUE

Le compostage du fumier de bovins laitiers apparaît à première vue relativement simple et de fait, les techniques sont et doivent l'être dans le contexte pratique agricole. À l'échelle de la ferme, les procédés de compostage sont relativement limités mais les techniques adaptées à l'exploitation et les pratiques visant l'optimisation du procédé sont nombreuses (quantités de litière ou absorbant, types d'absorbants, nombre de retournements, etc.). La figure 1.3 présente le schéma de la gestion des fumiers par compostage.

Quel que soit le procédé de compostage retenu et le mode opératoire pratiqué, le compostage du fumier de bovins laitiers poursuit un objectif commun qui est l'accélération des processus de stabilisation du fumier. Pour ce, le substrat à composter doit rencontrer certaines caractéristiques physiques et chimiques qui permettent le déroulement optimal des processus de compostage.

Le fumier de bovins laitiers est composé des urines et des fèces produites par les animaux. Il comprend également une quantité variable de litière disposée à l'étable. Les quantités moyennes de litière utilisées par les producteurs et les teneurs en eau élevées des déjections se traduisent par la production de fumier dont l'humidité est élevée. Conséquemment, il est probable que les processus de compostage soient ralentis et que la production et la gestion des liquides ne soient pas entièrement éliminées par les opérations de compostage.

Pour pallier à l'humidité élevée du fumier de bovins laitiers, l'ajout de litière ou l'essorage du fumier sont envisageables pour que les processus de compostage se déroulent rapidement. L'addition de litière ou d'absorbants peut se faire à l'étable, lors de l'entreposage du fumier avant le compostage ou lors de la confection des amas de compost. L'essorage du fumier peut se faire naturellement (lors de l'entreposage) ou mécaniquement.

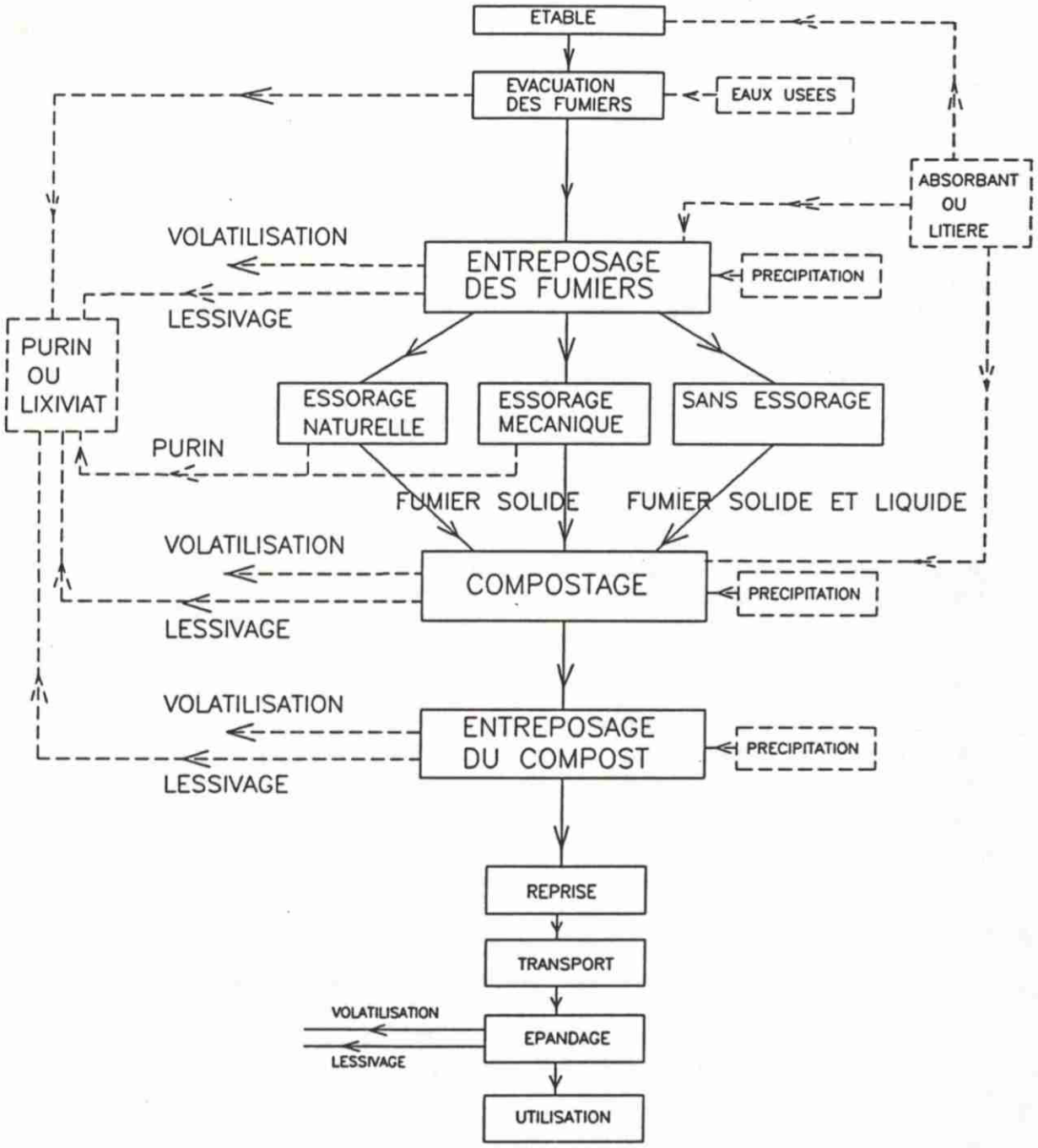



**Figure 1.3 : Compostage et gestion des fumiers**

Lors du l'entreposage du fumier, on observe des pertes par volatilisation ou par lessivage des éléments fertilisants majeurs notamment pour l'azote et le potassium. Cet aspect soulève des préoccupations d'ordre environnemental et agronomique qui s'adressent également aux opérations de compostage du fumier de bovins laitiers. L'ampleur des pertes doit donc être établie pour un procédé de compostage et son mode opératoire afin de préciser les gains agronomiques et environnementaux obtenus par compostage. Les coûts associés au compostage des fumiers doivent être comparés avec ceux inhérents à la gestion conventionnelle du fumier de bovins laitiers.

## 1.5 CONCLUSION

Le compostage du fumier de bovins laitiers constitue un mode de gestion du fumier qui suscite depuis quelques années, un intérêt croissant. Le compostage saisonnier du fumier constitue une étape supplémentaire à la chaîne de gestion conventionnelle du fumier de bovins laitiers. Cette étape additionnelle s'imbrique entre l'entreposage du fumier et sa reprise pour l'épandage aux champs.

Il est également envisageable d'éliminer l'entreposage du fumier en utilisant une technique de compostage en continu lorsque le fumier est acheminé rapidement de l'étable au site de compostage et ce, quotidiennement et durant toute l'année. L'alternative de composter en continu dans une enceinte couverte suscite actuellement un vif intérêt et mérite, en ce sens, une attention particulière.

Les équipements, le temps et la main-d'oeuvre requis pour le compostage doivent se justifier par l'obtention de gains qui sont d'ordre agronomique, environnemental et/ou économique.

Quel que soit la technique de compostage, les paramètres qui influencent le déroulement des processus de transformation de la matière organique sont les mêmes. Or, le fumier de bovins laitiers frais ou entreposé possède certaines caractéristiques dont les valeurs ne rencontrent pas celles qui sont requises pour le compostage optimisé d'un substrat organique. En effet, ce type de fumier est généralement trop humide et son rapport C/N est trop faible.

Pour pallier à l'humidité élevée du fumier de bovins laitiers, l'ajout de litière ou l'essorage du fumier sont envisageables pour que les processus de compostage se déroulent rapidement. L'addition de litière ou d'absorbants peut se faire à l'étable, lors de l'entreposage du fumier avant le compostage ou lors de la confection des amas de compost. Elle a également comme conséquence de rehausser le rapport C/N du fumier. L'essorage du fumier peut se faire naturellement (lors de l'entreposage) ou mécaniquement.

Lors de l'entreposage du fumier, on observe des pertes par volatilisation ou par lessivage des éléments fertilisants majeurs notamment pour l'azote et le potassium. Cet aspect soulève des préoccupations d'ordre environnemental et agronomique qui s'adressent également aux opérations de compostage du fumier de bovins laitiers. L'ampleur des pertes doit donc être établie pour un procédé de compostage et son mode opératoire afin de préciser les gains agronomiques et environnementaux obtenus par compostage.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Antoun, H., Cescas M.P., Vissard S.A. et Joyal P., (1983). Analyse des fumiers solides. Rapport de recherche présenté au Conseil de recherches et service agricole du Québec, Département des sols. Université Laval. 25 p.

Bell, R.G., Pos, J. et Lyon, R.L. (1973). Production of Composts from Soft Wood Lumber Mill Wastes. Compost Science Land Util., 14 (2):5.

BIOREX, (1989). Le compostage du fumier à la ferme, étude de faisabilité technico-économique et évaluation des impacts agronomiques et environnementaux : Rapport final préliminaire. Québec : ministère de l'Environnement, 275 p.

Consultants BPR inc., (1993). Développement et démonstration de nouveaux concepts «Évacuation-entreposage-reprise» des fumiers de bovins laitiers : Rapport final préliminaire. Québec : ministère de l'Environnement, 65 p.

CPVQ et service du génie MAPAQ. (1992). Structure d'entreposage des fumiers, lisiers et purins : manuel d'ingénierie, AGDEX-710, 135 p.
CREAQ, (1988). Fumier de ferme, production. Agdex 538/729.

De Bertoldi, M. et Zucconi F. (1986). Compost Specifications for the Production and Characterization of Compost from Municipal Solid Waste. Dans Compost : Production, Quality and Use. Commission of the European Communities. Elsevier Applied Science. p. 30-50

Finstein, M.S. (1980). Composting Microbial Ecosystem : Implication for Process Design and Control. Compost Science 21 (4) : 25-27.

Fortin, J.A., Chapleau, M., Couture, M. et Guay, E. (1982). Décomposition de la matière organique et compostage de surface : Une revue de littérature, publication du ministère de l'Énergie et des Ressources en collaboration avec le MAPAQ et la Faculté de foresterie de l'Université Laval, 89 p.

Golueke, C.G. (1976). Composting : a Review of Rationale, Principles and Public Health. Compost Science 17, (3) : 11-15.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES (suite)

Golueke, C.G. (1991). Principles of Composting : Understanding the Process. Tiré de The Art & Science of Composting, Biocycle Journal of Waste Recycling, The JG Press Inc., 270 p.

Hoitink, H.A.J. et Poole, H.A. (1979). Factors that Affect Bark Composting. Am Nurseryman, 150, (2) : 23, 189 pp.

Jeris, J.S., Regan, R.W., 1973, Controlling Environmental Parameters for Optimum Composting : part I Experimental Procedures and Temperature. Compost Science, 23 p.

Kirchman, H. et Witter E. (1988). Ammonia Volatilization During Aerobic and Anaerobic Manure Decomposition. Plant and Soil, 115, 35-41.

L'Heureux, M.B. (1993). Le compostage des fumiers de bovins laitiers sous aération forcée. 2e congrès annuel du conseil canadien du compostage, Institut de technologie agro-alimentaire. p. 255 à 274

McGauhey, P.H. et Golueke, C.G. (1953). Reclamation of Municipal Refuse by Composting. Tech. Bull. No. 9, Sanitary Eng. Res. Lab., University of California.

Mustin, M. (1987). Le compost: gestion de la matière organique. Édition François Dubusc, Paris, 954 p.

Pelczan M.J., Chan E.C.S. et Fontaine, J. (1982). Éléments de microbiologie. Les Éditions HRW ltée, 496 p.

Pos, J. (1990). General Composting-Theory and Methods. Composting of Municipal Solid waste Fractions, Short Course, Guelph, December 13 and 14 1990, p. 1-26.

Robert, L. (1992). Caractérisation et variabilité des fumiers au Québec. Colloque sur la gestion des fumiers, Drummondville, Québec. CPVQ. p. 203-214.

Robitaille, R. (1994). Composter ou non vos fumiers? À vous de choisir. Le producteur laitier québécois, février 1994, p. 22-25.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES (suite)

Taiganides, P. E. (1977). Composting of Feedlot Wastes. Animal Wastes, Applied Science Publishers Ltd, London, p. 241-251.

Thostrup, P. (1985). Heat Recovery from Composting Solid Manure. In : Composting of Agricultural and Other Wastes, Edited by J.K.R. Gasser, Seminar Held at Brasenose College, Oxford, UK, 19-20 March 1984, p.167-180.

# CHAPITRE 2 : CARACTÉRISTIQUES DE DIVERS ABSORBANTS EN LABORATOIRE

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE
INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

## 2.1 INTRODUCTION

L'utilisation de litière disposée sous les animaux est une pratique rencontrée sur la quasi-totalité des fermes laitières québécoises. La litière utilisée sur la ferme permet principalement d'assurer le confort et la propreté des animaux (Ensminger, 1980). Du point de vue gestion des fumiers, les litières permettent l'absorption partielle ou complète de la partie liquide des déjections et favorisent l'obtention d'un fumier à consistance solide. La nature et la quantité de litière utilisée à la ferme influencent directement les techniques utilisées pour la gestion complète des fumiers (évacuation, entreposage, compostage, épandage), l'impact environnemental de ces pratiques et la qualité du produit final.

À la fin des années 80, 91,4 % des exploitations laitières québecoises utilisaient la paille et 51,6 % d'entre-elles faisaient usage additionnel de refus de foin (BIOREX, 1989). Dans le contexte régional de chaque entreprise laitière, d'autres matériaux pourraient être employés comme litière en remplacement complet ou partiel de la paille et du foin. Le nombre de combinaisons paille-foin et autres absorbants devient à toute fin pratique illimité.

Bien que l'emploi de litière à la ferme soit une pratique ancienne et courante, il existe peu d'informations précises sur le pouvoir absorbant (ou la capacité d'absorption) des matériaux conventionnellement utilisés ou potentiellement utilisables à la ferme laitière en contexte québécois.

Les matériaux organiques potentiellement utilisables comme litière à la ferme sont nombreux. La littérature fait état du pouvoir absorbant de certains matériaux mais ne couvre pas l'ensemble des matériaux disponibles dans le contexte québécois.

Le choix du type de litière repose sur un ensemble de facteurs : disponibilité, coût, pouvoir absorbant, poussière, etc.. Dans le contexte d'utilisation de litière comme absorbant des liquides produits à l'étable, deux aspects apparaissent importants à considérer soit : le potentiel d'absorption du matériel et la vitesse à laquelle il peut absorber le liquide. Le potentiel d'absorption sera fonction de l'humidité initiale du matériel alors que la vitesse d'absorption dépendra notamment de la qualité du contact entre la litière et les liquides.

Une des solutions pour l'optimisation du compostage du fumier de bovins laitiers réside dans l'utilisation adéquate de litière pour réduire la teneur en eau du fumier et élever son rapport C/N. À la ferme, la quantité de litière utilisée est également un

facteur important à considérer. D'une part, la quantité de litière disponible pourra être limitée pour des raisons d'approvisionnement ou en raisons de contraintes économiques. D'autre part, la quantité de litière utilisée à l'étable est limitée par les systèmes d'évacuation du fumier. Finalement, l'emploi de quantités importantes de litière exigera du travail supplémentaire et une aire d'entreposage importante pour la litière.

Pour toutes ces considérations, il apparaissait important de bien identifier les caractéristiques physiques et chimiques de plusieurs matériaux potentiellement utilisables comme litière et/ou absorbant et disponibles dans le contexte québécois. À partir de ces données, il est possible de préciser la quantité de litière requise pour absorber les liquides et pour composter de façon optimale le fumier.

## 2.2 OBJECTIFS

Les essais réalisés au CRIQ sur l'absorption en eau de divers matériaux absorbants visent à acquérir des données de base supplémentaires sur le comportement des matériaux absorbants disponibles au Québec et potentiellement utilisables comme litière à la ferme.

De façon plus spécifique les objectifs de ces travaux sont :

1. d'identifier d'autres matériaux absorbants d'origine urbaine ou industrielle utilisables comme litière et d'évaluer leur potentiel d'utilisation pour le compostage à la ferme;

2. de déterminer en laboratoire le pouvoir d'absorption en eau de divers absorbants et la vitesse à laquelle les matériaux absorbe le liquide.

## 2.3 REVUE DE LITTÉRATURE

La quantité minimale de paille d'avoine ou de blé non hachée à utiliser sur la ferme laitière pour favoriser le compostage est estimée à 4 kg/vache/j, ce qui correspond théoriquement à la quantité nécessaire pour absorber la totalité des liquides (Ensminger, 1980). Ainsi, pour chaque tonne de déjections produite, on utilisera 250 kg de litière.

Des essais d'absorption en eau avec divers types de matériaux ont fait l'objet de quelques publications (Fortier, 1990; Sobel, 1988; Peltola, 1985; Ensminger, 1980; Reed, 1970). Les méthodes utilisées varient d'un auteur à l'autre en ce qui concerne notamment les temps d'absorption et d'égouttement ainsi que le mode d'expression des résultats. Les travaux de Sobel (1988) démontrent que la paille d'avoine hachée et la sciure de bois ont une capacité d'absorption en eau similaire, soit environ 5,3 kg eau absorbable/kg de litière sèche alors qu'exprimée sur une base de matériel humide, la capacité d'absorption en eau de la paille humide (TEE = 14 %) est neuf fois plus élevée que celle de la sciure humide (TEE = 76 %).

À défaut de connaître les caractéristiques des matériaux utilisés, on prend pour acquis qu'une appellation similaire utilisée par les auteurs implique des matériaux aux caractéristiques identiques.

Certains résultats sur la capacité d'absorption en eau des pailles s'avèrent contradictoires. Les résultats de Ensminger (1980) démontrent que les pailles hachées d'avoine et de blé retiennent environ 25 % plus de liquide que les pailles longues. Par ailleurs, les travaux de Fortier (1990) indiquent que les pailles humides lâches d'avoine, de blé et d'orge retiennent en moyenne 9 % plus d'eau que les pailles hachées. Les pailles à l'étude se classent par ordre décroissant d'eau absorbée sur une base de litière sèche de la façon suivante : paille d'orge, de blé et d'avoine. L'ordre inverse est présenté par Ensminger (1980).

Ensminger (1980) et Sobel (1988) présentent des résultats concernant les sciures de bois. En général, la capacité d'absorption en eau des sciures de bois mous est deux fois plus élevée que celle des sciures de bois durs.

Les seules données trouvées sur les temps d'absorption sont celles de Sobel (1988). Le temps nécessaire pour l'absorption maximale de l'eau s'élève à 30 heures pour la sciure de bois dur et 110 heures pour la paille d'avoine hachée.

Les essais d'absorption en eau et en urine réalisés par Peltola (1985) démontrent que la paille, la sciure de bois et les copeaux de rabotage absorbent de plus grandes masses d'eau que d'urine par unité de litière humide. Parmi les matériaux étudiés, seule la tourbe absorbe plus l'urine que l'eau.

Peltola (1985) a réalisé des essais de compression avec divers matériaux et a noté leurs pertes massiques d'eau. Le classement est le suivant, du plus élevé au plus faible : la tourbe, les copeaux de rabotage, la paille et la sciure de bois.

## 2.4 MATÉRIEL ET MÉTHODE

### 2.4.1 MATÉRIAUX

Au total, 17 matériaux organiques potentiellement utilisables comme litière et/ou absorbant sur la ferme laitière ont été retenus pour fins de caractérisation et pour les essais d'absorption et de compression en laboratoire. Deux matériaux minéraux ont également fait l'objet de caractérisation.

Paille d'avoine et d'orge non hachée : balles de paille entreposées à l'intérieur de l'étable provenant de deux fermes différentes; longueur moyenne des brins de 15 à 20 cm.

Paille d'avoine et d'orge hachée : balles de paille provenant de deux fermes différentes, broyées mécaniquement à l'aide d'un hache paille; longueur maximale des brins de 10 cm.

Foin : foin de deuxième qualité composé de brome et de mil broyé mécaniquement avec un hache paille; longueur maximale des brins de 10 cm.

Résidus de maïs : principalement composés de tiges et de feuilles de maïs-grain déchiquetées et laissées au champ ; broyage supplémentaire en laboratoire à 5,2 cm de longueur moyenne.

Tourbe blonde, brune et noire : mousse de sphaigne fibreuse pressée en ballot provenant respectivement de la Côte-Nord du St-Laurent, de la région de Québec et de la région de Rivière-du-Loup; classification générale utilisée par l'industrie.

Sciure de bois dur : matériel frais entreposé sous un abri provenant du sciage des billots; composé de merisier, d'érable et de bouleau; la dimension des particules est inférieure à 10 mm.

Sciure de tremble : particules de bois frais issues du sciage et entreposées sous un abri; la dimension des particules est inférieure à 10 mm.

Ripe de pin : copeaux de rabotage séchés et vendus ensachés; l'épaisseur des particules est inférieure à 1 mm.

Écorce de tremble : matériel frais, entreposé sous un abri provenant de l'écorçage des arbres contenant une faible proportion d'écorces de résineux; les dimensions maximales sont de 15 cm de longueur et 8 cm de largeur.

Copeaux d'élagage : résidus d'élagage des arbres prélevés à l'automne et contenant encore des feuilles vertes principalement d'érable.

Papier journal : papier journal haché mécaniquement avec un hache papier; dimension variant de 20 cm x 5 cm à 4 cm x 4 cm.

Boues papetières : boues pressées mécaniquement provenant du traitement primaire des eaux usées d'une papetière utilisant un procédé thermomécanique; teneur en eau supérieure aux valeurs habituellement enregistrées par l'entreprise.

Feuilles d'érable : matériel plus ou moins humide ramassé au sol à l'automne; absence de pluie dans les 24 heures précédant l'échantillonnage.

Phosphate minéral naturel : minerai en poudre provenant des dépôts de phosphate de Floride.

Poudre de basalte : poudre de roche volcanique de granulométrie inférieure à 2 mm.

## 2.4.2 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

### 2.4.2.1 Caractérisation des matériaux

Masse volumique apparente sèche et humide (MVA)

La masse volumique apparente humide (MVA b.h.) est déterminée à partir du matériel humide, tel que reçu. Elle exprime le rapport entre la masse et le volume de matériel. Le matériel est placé dans un récipient de 1,31 L en prenant soin de ne pas le comprimer.

$$\text{MVA b.h. (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{masse du matériel humide (g)}}{\text{volume du matériel humide (cm}^3\text{)}} \times 1000 \qquad (1)$$

La masse volumique apparente sèche (MVA b.s.), est déterminée à partir du matériel préalablement séché au four à 105 °C (masse de matériel sec). Elle exprime le rapport entre la masse et le volume de matériel sec. Le volume de matériel sec est déterminé à l'aide d'un récipient de 1,31 L en prenant soin de ne pas le comprimer.

$$\text{MVA b.s. } (kg/m^3) = \frac{\text{masse du matériel sec (g)}}{\text{volume du matériel sec } (cm^3)} \times 1000 \quad (2)$$

La masse volumique apparente corrigée (MVAC), exprime le rapport entre la masse d'un matériel sec basé et le volume occupé par le matériel à l'état humide. La MVAC est calculée suite à la détermination de la MVA b.h. et de la teneur en eau b.h. du matériel.

$$\text{MVAC } (kg/m^3) = \frac{\text{masse du matériel sec (g)}}{\text{volume du matériel humide } (cm^3)} \times 1000 \quad (3)$$

Teneur en eau

La teneur en eau (TEE), également appelée humidité, exprime le contenu en eau d'une masse de matériel. Elle s'exprime en g eau/100 g de matériel sec (b.s.) ou humide (b.h.) ou encore en pourcentage (%). Le matériel humide est séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à poids constant pour déterminer la masse d'eau dans le matériel.

$$\text{TEE b.h. } (\%) = \frac{\text{Masse d'eau (g) X 100}}{\text{Masse de matériel humide (g)}} \quad (4)$$

$$\text{TEE b.s. } (\%) = \frac{\text{Masse d'eau (g) X 100}}{\text{Masse de matériel sec (g)}} \quad (5)$$

Cendres

La masse de cendres est déterminée par la calcination du matériel sec à 375 °C.

$$\text{Cendres b.s. } (\%) = \frac{\text{Masse de cendres (g) X 100}}{\text{Masse de matériel sec (g)}} \quad (6)$$

Matière organique

La matière organique (M.O. b.s.) est déterminée par calcination à 375 °C du matériel préalablement séché à 105 °C, suivant la «Méthode d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux du CPVQ, Méthode MA-2, Analyse matière organique, Agdex 533». Elle désigne le rapport entre la masse de matière organique et la masse de matière sèche pour un matériel donné.

$$\text{M.O. b.s. (\%)} = \frac{\text{Masse de matière organique (g)}}{\text{Masse de matériel sec (g)}} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{M.O. b.s.} = 100 - \text{cendres b.s. (\%)} \quad (8)$$

Carbone organique

Pour les amendements organiques riches en matière organique, le Carbone organique base sèche (C org. b.s.), est déterminé en divisant la valeur de la matière organique b.s. par le facteur 1,724. (Méthode d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux, CPVQ, Méthode MA-2, Analyse matière organique, Agdex 533).

$$\text{C org. b.s. (\%)} = \frac{\text{M.O. b.s. (\%)}}{1{,}724} \quad (9)$$

Rapport C/N

$$\text{C/N} = \text{C org. b.s. (\%)} / \text{NTK b.s. (\%)} \quad (10)$$

Le rapport C/N exprime la teneur en carbone organique b.s. divisée par la teneur en azote total Kjeldahl b.s..

pH

Le pH des matériaux est déterminé par la méthode du pH à l'eau. Le ratio masse du substrat : volume de l'eau ajouté est compris entre 1:1 et 1:8 pour l'ensemble des matériaux. Pour chacun des matériaux, l'ajout d'eau au substrat est fait pour le plus faible ratio (masse du substrat : volume d'eau) permettant une lecture fiable du pH.

Azote total Kjeldahl (NTK)

La teneur en azote total Kjeldahl comprend l'azote organique et minéral excluant les formes $N\text{-}NO_2^-$ et $N\text{-}NO_3$. Elle est déterminée par la méthode du «Manual on soil sampling and methods of analysis, Agriculture Canada 1976, Macro Kjeldahl, without steps to include $NO_2^-$ and $NO_3$, 3.624». Avec les matériaux absorbants, les échantillons sont préalablement séchés à l'air. La teneur en azote total b.s s'exprime en % ou en g de NTK par 100 g de matériel sec.

Phosphore et potassium total

Les teneurs en phosphore et en potassium sont déterminées suivant la méthode d'analyse présentée dans le «Répertoire des méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux, du CPVQ, Méthode FO-1, Analyse foliaire, Agdex 533». La solution extractive utilisée est du HCl 5 %.

### 2.4.2.2 Essais d'absorption/compression en laboratoire

Les essais d'absorption des litières en laboratoire ont été effectués avec de l'eau potable domestique pour tous les absorbants à l'étude. Des essais additionnels d'absorption avec du liquide provenant du dalot (urine) ont été réalisés avec la paille d'orge non hachée, la ripe de pin et la tourbe blonde. La difficulté de s'approvisionner en urine et la complexité de travailler sur une longue période de temps avec un produit hautement fermentescible expliquent le nombre d'essais limités avec le liquide du dalot.

Les essais en laboratoire incluaient également la mesure de la perte en eau et de l'affaissement suite à l'application d'une pression mécanique.

#### 2.4.2.2.1 Essais d'absorption en eau et en urine

Un volume approximatif de un litre de matériel à l'état humide (humidité lors de l'échantillonnage) est placé dans un coton à fromage préalablement séché à 105 °C avec lequel on forme un sac. Le coton à fromage et son contenu sont enfermés dans un récipient en plastique troué, d'un volume de deux litres. Le contenant est immergé dans un bassin d'eau et retiré après 3, 7, 11, 23, 47, 71, 95 heures, etc. pour être pesé après un temps d'égouttement d'une heure. Le cycle trempage/égouttage se poursuit jusqu'à l'obtention d'un poids humide constant qui correspond à la quantité d'eau absorbée maximale. La période d'absorption en eau comprend le temps de trempage

et le temps d'égouttement. Le nombre de répétitions des essais d'absorption varie entre deux et quatre selon les matériaux. Chaque répétition comprend deux échantillons d'un même matériel. Ainsi les points des courbes présentées aux figures 2.1 à 2.8 représentent des valeurs moyennes.

Ces essais permettent de déterminer les paramètres suivants :

| | |
|---|---|
| Teneur en eau sur une base humide : | TEE b.h. |
| Quantité d'eau absorbée effective : | QEA eff. |
| Capacité d'absorption en eau sur une base humide : | CAE b.h. |

La TEE initiale correspond à la teneur en eau du matériel au début du test d'absorption. On l'utilise pour déterminer la QEA eff. (Quantité d'eau absorbée effective). Ce paramètre représente la masse d'eau absorbée par le matériel après un temps donné en surplus de celle initialement contenue dans ce matériel (à TEE initiale) La TEE sera maximale lorsque le matériel aura atteint la saturation, ce qui correspond à la quantité d'eau maximale qu'il peut absorber.

$$\text{QEA eff.} \left(\frac{\text{kg eau absorbée}}{\text{kg matériel humide}}\right) = \frac{\text{masse d'eau (kg) - masse d'eau à TEE initiale (kg)}}{\text{masse humide du matériel à TEE initiale (kg)}} \quad (11)$$

La CAE (capacité d'absorption en eau) correspond à la quantité d'eau qu'un matériel peut absorber compte tenu de sa TEE. La CAE s'exprime sur une base humide (b.h.), sur une base sèche (b.s.) ou sur une base volumique:

$$\text{CAE b.h.} \left(\frac{\text{kg d'eau absorbable}}{\text{kg de matériel humide}}\right) = \frac{\text{masse d'eau à saturation (kg) - masse d'eau à TEE donnée (kg)}}{\text{masse humide du matériel à TEE donnée (kg)}} \quad (12)$$

$$\text{CAE b.s.} \left(\frac{\text{kg d'eau absorbable}}{\text{kg de matériel sec}}\right) = \frac{\text{masse d'eau à saturation (kg) - masse d'eau à TEE donnée (kg)}}{\text{masse de matériel sec (kg)}} \quad (13)$$

$$\text{CAE volumique} \left(\frac{\text{litre d'eau absorbable}}{\text{litre de matériel humide}}\right) = \frac{\text{volume d'eau à saturation (L) - volume d'eau à TEE donnée (L)}}{\text{volume de matériel humide (L)}} \quad (14)$$

La CAE b.h. s'exprime en kg d'eau absorbable / kg de matériel humide. Elle signifie plus simplement «le nombre de fois le poids en eau absorbable par unité de litière humide». La CAE b.h est calculée à partir des essais d'absorption en eau et plus spécifiquement de la QEA eff. maximale. Elle sera maximale pour une TEE égale à 0 % et nulle pour un matériel saturé en eau.

### 2.4.2.2.2 Essais de compression

Une presse hydraulique munie d'un manomètre a été conçue pour s'adapter aux récipients utilisés lors des tests d'absorption. Ces essais de compression consistent à placer le récipient troué contenant l'échantillon saturé provenant du test d'absorption (volume approximatif de un litre) sous la presse hydraulique. Les pressions suivantes ont été exercées sur la surface du matériel: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33 et 36 kPa. Le liquide extrait du matériel est recueilli après l'application des pressions et mesuré après un certain temps de drainage (jusqu'à l'arrêt de l'égouttement). Les résultats présentés pour les tests de compression représentent la moyenne de trois répétitions.

En pratique, des pressions similaires sont rencontrées lorsque les matériaux sont empilés ou manipulés. Par exemple, théoriquement une pression de 36 kPa serait mesurée à la base d'un tas de fumier de 16 pi (4,9 m) de haut, dont la MVA b.h. moyenne est de 750 kg/m$^3$. En ce qui concerne la pression qui est appliquée sur une particule à une hauteur intermédiaire dans le tas, la relation mathématique qui calculerait cette valeur est plus complexe et n'a pas fait l'objet d'investigations lors de ces travaux.

Ces essais permettent de déterminer la QEA eff. d'un matériel soumis à diverses pressions. Pour une pression donnée, la QEA eff. se calcule de la façon suivante :

$$\text{QEA eff. à pression donnée } \left(\frac{\text{kg d'eau absorbée}}{\text{kg de matériel humide}}\right) = \frac{\text{masse d'eau à sat. (kg) - masse d'eau perdue à pression donnée (kg) - masse d'eau à TEE initiale fixée (kg)}}{\text{masse de matériel humide à TEE initiale fixée (kg)}} \quad (15)$$

La TEE initiale fixée correspond à des valeurs jugées représentatives pour chaque matériaux décrit au tableau 2.5. Les QEA eff. des essais de compression s'expriment en kg d'eau absorbée (retenue) par kg de matériel humide. L'intérêt de définir les QEA eff. pour le test de compression réside dans le fait que l'on peut comparer ces valeurs avec celles des QEA eff. obtenues par les tests d'absorption.

Les valeurs des QEA eff. obtenues des essais de compression pour une pression nulle peuvent être légèrement différentes des valeurs de QEA eff. maximales obtenues lors du test d'absorption. En effet, ces deux valeurs sont obtenues par le lissage de chacune des courbes respectives des essais d'absorption et de compression.

Ces essais nous ont également permis de déterminer l'affaissement du matériel en fonction de la pression appliquée. L'affaissement est défini comme suit :

$$\text{Affaissement (\%)} = \frac{\text{haut. initiale (cm) - haut. à pression donnée (cm)}}{\text{hauteur initiale du matériel (cm)}} \times 100 \qquad (16)$$

Ces équations nous permettent donc d'établir pour chaque absorbant des courbes d'affaissement en fonction de la pression appliquée (de 0 à 36 kPa).

## 2.5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### 2.5.1 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES ABSORBANTS

Les masses volumiques apparentes (MVA) et les teneurs en eau (TEE) initiales pour chaque matériau à l'étude sont présentées au tableau 2.1. Les valeurs représentent la moyenne de trois (3) répétitions. La teneur en eau b.h. des matériaux organiques varie considérablement (11,3 % pour la ripe de pin et 68,9 % pour la boue papetière). La TEE initiale d'un absorbant pourra varier en fonction notamment de la nature du procédé de fabrication, des conditions climatiques, de son mode d'entreposage, etc. La TEE b.h. moyenne des pailles échantillonnées s'établit à 16,8 % et la valeur utilisée pour les exemples de calculs est fixée à 15 %. La TEE des résidus de bois est également variable (11,3 % pour la ripe de pin et 50,1 % pour les copeaux d'élagage).

La MVA b.h. des pailles, foin, résidus de maïs, papier journal haché et feuille d'érable est d'environ 20 kg/m$^3$, celles des tourbes de 100 kg/m$^3$, celles des résidus de bois (sciures, ripe, écorces et copeaux) de 200 kg/m$^3$ et finalement la boue papetière échantillonnée avait une MVA b.h. de 306 kg/m$^3$. On remarque en général pour une même catégorie de matériel absorbant, que plus la TEE est élevée, plus la MVA est élevée.

Le tableau 2.2 présente les valeurs de matière organique, de carbone organique, de cendres et le rapport C/N des matériaux. Les matériaux organiques étudiés ont des teneurs en matière organique élevées variant de 89,7 % pour les feuilles à 99,8 % pour la ripe de pin. Les résidus de bois, le papier journal et la boue papetière ont des C/N élevés variant de 146 pour l'écorce de tremble à 723 pour la ripe de pin. Le C/N des pailles, du foin et des résidus de maïs est moins élevé et il varie de 47 à 95.

Les valeurs de pH et le contenu en éléments majeurs des matériaux sont présentés au tableau 2.3. Ces analyses ont été effectuées par le Service de recherche en sols du MAPAQ.

Le pH des tourbes et des feuilles d'érable est d'environ 4. Un pH d'environ 5 a été mesuré pour les sciures, la ripe, les écorces, les copeaux, le papier journal et les boues papetières. Finalement un pH légèrement alcalin d'environ 8 a été mesuré pour les pailles et les résidus de maïs.

De façon générale, les concentrations en éléments majeurs (N-P-K) sont plus élevées dans les résidus de culture à la ferme tels que les pailles et les résidus de maïs que dans les autres types de matériaux absorbants.

# TABLEAU 2.1 : MASSES VOLUMIQUES APPARENTES ET TENEURS EN EAU INITIALES DES MATÉRIAUX

| MATÉRIAUX | MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (kg/m³) | | | TENEUR EN EAU (%) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | sèche | humide | corrigée sèche | b.h. | b.s. |
| Paille d'avoine | 12 | 14 | 12 | 13,6 | 15,7 |
| Paille d'avoine hachée | 15 | 17 | 14 | 19,3 | 24,0 |
| Paille d'orge | 10 | 15 | 12 | 17,5 | 21,3 |
| Paille d'orge hachée | 11 | 16 | 14 | 16,7 | 20,0 |
| Foin | 15 | 20 | 16 | 17,9 | 21,8 |
| Résidus de maïs | 18 | 36 | 18 | 50,2 | 102,1 |
| Tourbe blonde | 48 | 73 | 35 | 52,4 | 109,9 |
| Tourbe brune | 78 | 146 | 56 | 61,9 | 163,3 |
| Tourbe noire | 95 | 112 | 71 | 36,3 | 57,0 |
| Sciures de bois franc | 160 | 231 | 144 | 37,8 | 60,8 |
| Sciures de tremble | 113 | 188 | 100 | 46,6 | 87,4 |
| Ripe de pin | 85 | 100 | 89 | 11,3 | 12,7 |
| Écorces de tremble | 155 | 253 | 139 | 45,0 | 81,9 |
| Copeaux d'élagage | 107 | 188 | 94 | 50,1 | 100,6 |
| Papier journal haché | 13 | 17 | 15 | 11,5 | 13,0 |
| Boues de papetières | 384 | 306 | 95 | 68,9 | 221,7 |
| Feuilles d'érable | 12 | 15 | 7 | 49,0 | 99,9 |
| Phosphate minéral naturel | 922 | 915 | 902 | 1,3 | 1,4 |
| Poudre de basalte | 1 227 | 911 | 854 | 6,2 | 6,6 |

## TABLEAU 2.2 : TENEURS EN MATIÈRE ORGANIQUE ET RAPPORT C/N DES MATÉRIAUX

| MATÉRIAUX | M. O. b.s. (%) | C. O. b.s. (%) | CENDRES b.s. (%) | C/N |
|---|---|---|---|---|
| Paille d'avoine | 94,7 | 54,9 | 5,3 | 95 |
| Paille d'avoine hachée | - | - | - | - |
| Paille d'orge | 93,4 | 54,2 | 6,6 | 63 |
| Paille d'orge hachée | - | - | - | - |
| Foin | 94,2 | 54,7 | 5,8 | 47 |
| Résidus de maïs | 90,7 | 52,6 | 9,3 | 74 |
| Tourbe blonde | 96,5 | 56,0 | 3,5 | 80 |
| Tourbe brune | 97,5 | 56,5 | 2,5 | 59 |
| Tourbe noire | 98,7 | 57,3 | 1,3 | 75 |
| Sciures de bois franc | 99,2 | 57,6 | 0,7 | 443 |
| Sciures de tremble | 99,5 | 57,7 | 0,5 | 577 |
| Ripe de pin | 99,8 | 57,9 | 0,2 | 723 |
| Écorces de tremble | 95,6 | 55,4 | 4,4 | 146 |
| Copeaux d'élagage | 95,6 | 55,5 | 4,3 | 88 |
| Papier journal haché | 99,6 | 57,8 | 0,3 | 525 |
| Boues de papetières | 94,3 | 54,7 | 5,6 | 211 |
| Feuilles d'érable | 89,7 | 52,0 | 10,3 | 63 |
| Phosphate minéral naturel | 2,8 | 1,6 | 97,2 | - |
| Poudre de basalte | 0,2 | 0,1 | 99,8 | - |

## TABLEAU 2.3 : pH ET CONCENTRATIONS EN ÉLÉMENTS FERTILISANTS MAJEURS DES MATÉRIAUX

| MATÉRIAUX | pH eau | NTK b.s.[1] (%) | Ptot b.s. [2] (%) | Ktot b.s. [2] (%) |
|---|---|---|---|---|
| Paille d'avoine | 7,85 | 0,58 | 1,46 | 8,80 |
| Paille d'avoine hachée | - | - | - | - |
| Paille d'orge | 7,32 | 0,85 | 1,62 | 7,71 |
| Paille d'orge hachée | - | - | - | - |
| Foin | - | 1,16 | - | - |
| Résidus de maïs | 8,53 | 0,71 | 0,79 | 5,91 |
| Tourbe blonde | 3,96 | 0,70 | 0,24 | 0,20 |
| Tourbe brune | 3,88 | 0,96 | 0,30 | 0,19 |
| Tourbe noire | 4,07 | 0,76 | 0,21 | 0,13 |
| Sciures de bois franc | 5,64 | 0,13 | 0,03 | 0,84 |
| Sciures de tremble | 5,40 | 0,10 | 0,08 | 0,37 |
| Ripe de pin | 4,79 | 0,08 | 0,03 | 0,29 |
| Écorces de tremble | 4,65 | 0,38 | 0,46 | 1,97 |
| Copeaux d'élagage | 4,55 | 0,63 | 1,35 | 3,04 |
| Papier journal haché | 5,87 | 0,11 | 0,16 | 1,21 |
| Boues de papetières | 4,57 | 0,26 | 0,23 | 0,15 |
| Feuilles d'érable | 4,04 | 0,83 | 0,50 | 1,43 |
| Phosphate minéral naturel | - | - | - | - |
| Poudre de basalte | - | - | - | - |

1) NTK : Azote total sur échantillons séchés à l'air
2) Ptot et Ktot par HCl 5 %
Analyses réalisées par le MAPAQ, Service de recherche en sols 1991

## 2.5.2 CARACTÉRISTIQUES ABSORBANTES DES MATÉRIAUX

On retrouve au tableau 2.4, la QEA eff. exprimée en kg eau absorbée/kg de matériel humide à la TEE initiale pour différents temps d'absorption ainsi que la QEA eff. maximale et la TEE à saturation correspondante. Le nombre d'heures requis pour atteindre en laboratoire 95 % de la valeur maximale d'absorption en eau apparaît aussi au tableau 2.4. Pour chaque absorbant, les essais ont été répétés trois fois. Les QEA eff. en fonction du temps (vitesses d'absorption) ne sont valables que pour les TEE initiales indiquées. Des TEE initiales plus élevées ou plus faibles que celles obtenues lors des essais pourraient faire varier la vitesse d'absorption des matériaux et inévitablement les valeurs des QEA eff.; en effet, le caractère hydrophobe d'un matériel absorbant est fonction notamment de sa teneur en eau.

La TEE initiale varie considérablement d'un absorbant à l'autre (13 % à 67 %). L'humidité initiale d'un absorbant modifie son pouvoir d'absorption en eau. Les figures 2.1 à 2.4 présentent les QEA eff. des absorbants à l'étude en fonction du temps. Ces figures et le tableau 2.4 permettent de classer les matériaux selon la vitesse d'absorption en eau.

Après 4 heures d'imbibition, on note par ordre décroissant d'absorption en eau les matériaux suivants : la ripe de pin, la tourbe blonde, le papier journal, les tourbes brunes et noires, les pailles, les résidus de maïs et le foin. Après 24 heures d'imbibition, le classement diffère : la tourbe blonde se classe en première place, suivie de la tourbe noire, de la ripe de pin, du papier journal haché, de la tourbe brune, des pailles, du foin et des résidus de bois. Ainsi sur une courte période d'absorption, la ripe de pin s'est avérée être l'absorbant le plus efficace. Par contre sur une période de temps supérieure à 24 heures, la tourbe blonde est le matériel le plus absorbant suivie de la tourbe noire et de la ripe de pin. Le papier journal et la tourbe brune sont aussi des matériaux intéressants pour leurs propriétés absorbantes; ces deux matériaux, au comportement identique, absorbent en quelques heures beaucoup d'eau. Les pailles se sont révélées êtres des matériaux de bonne qualité absorbante tandis que le foin, les résidus de maïs, les feuilles d'érables et les sciures sont de qualités moyennes au niveau de leur propriété absorbante. Finalement, les copeaux d'élagage et les écorces de tremble sont des matériaux absorbants de faible qualité puisqu'ils sont saturés à une TEE d'environ 60 % et que leur teneur en eau est naturellement élevée.

En général, la plupart des matériaux sont saturés à une TEE comprise entre 76 et 82 %. Seules les tourbes ont une TEE à saturation d'environ 90 %. La TEE à saturation d'un matériel indique sa capacité maximale à absorber de l'eau. Plus sa capacité d'absorption en eau sera élevée, plus sa TEE à saturation sera élevée.

# TABLEAU 2.4 : ABSORPTION EN EAU DES MATÉRIAUX EN FONCTION DU TEMPS

| MATÉRIAUX | TEE INITIALE b.h. (%) | QEA eff. (kg d'eau absorbée/ kg de matériel humide) + | | | | | Temps pour QEA max. (h) +++ | TEE À SATURATION b.h. (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 4 h | 12 h | 24 h | 72 h | maximale ++ | | |
| Paille d'avoine | 13 | 1,55 | 2,25 | 2,70 | 3,40 | 3,60 | 96 | 81,1 |
| Paille d'avoine hachée | 19 | 1,55 | 2,10 | 2,50 | 2,90 | 2,95 | 48 | 79,6 |
| Paille d'orge | 14 | 1,55 | 2,25 | 2,80 | 3,50 | 3,70 | 72 | 82,1 |
| Paille d'orge hachée | 17 | 0,95 | 1,75 | 2,40 | 3,20 | 3,65 | 133 | 81,9 |
| Foin | 18 | 0,95 | 1,50 | 1,60 | 2,10 | 2,40 | 144 | 76,2 |
| Résidus de maïs | 48 | 1,20 | 1,30 | 1,60 | 1,70 | 1,75 | 48 | 81,3 |
| Tourbe blonde | 45 | 2,60 | 5,10 | 6,40 | 6,80 | 6,80 | 28 | 93,0 |
| Tourbe brune | 54 | 2,20 | 2,65 | 2,80 | 3,00 | 3,10 | 60 | 89,0 |
| Tourbe noire | 33 | 1,90 | 3,50 | 4,50 | 4,70 | 4,80 | 28 | 88,5 |
| Sciures de bois franc | 36 | 0,95 | 1,05 | 1,15 | 1,30 | 1,40 | 96 | 73,2 |
| Sciures de tremble | 49 | 0,55 | 0,80 | 0,90 | 1,00 | 1,20 | 168 | 77,0 |
| Ripe de pin | 13 | 3,75 | 3,80 | 3,85 | 3,90 | 4,00 | 12 | 82,3 |
| Écorces de tremble | 48 | 0,15 | 0,18 | 0,19 | 0,20 | 0,20 | 24 | 57,3 |
| Copeaux d'élagage | 53 | 0,15 | 0,18 | 0,22 | 0,28 | 0,30 | 80 | 63,5 |
| Papier journal haché | 14 | 2,40 | 2,82 | 3,00 | 3,20 | 3,50 | 120 | 80,3 |
| Boues de papetières | 67 | 0,55 | 0,68 | 0,70 | 0,80 | 0,80 | 36 | 81,6 |
| Feuilles d'érable | 50 | 0,55 | 0,95 | 1,20 | 1,50 | 1,50 | 56 | 80,1 |

\+ : Matériel humide à TEE initiale
++ : QEA eff. max. (test d'absorption) peut différer légèrement de QEA eff. à 0 kPa (test de compression).
+++ : Nombre d'heures pour atteindre 95 % de la QEA eff. max.

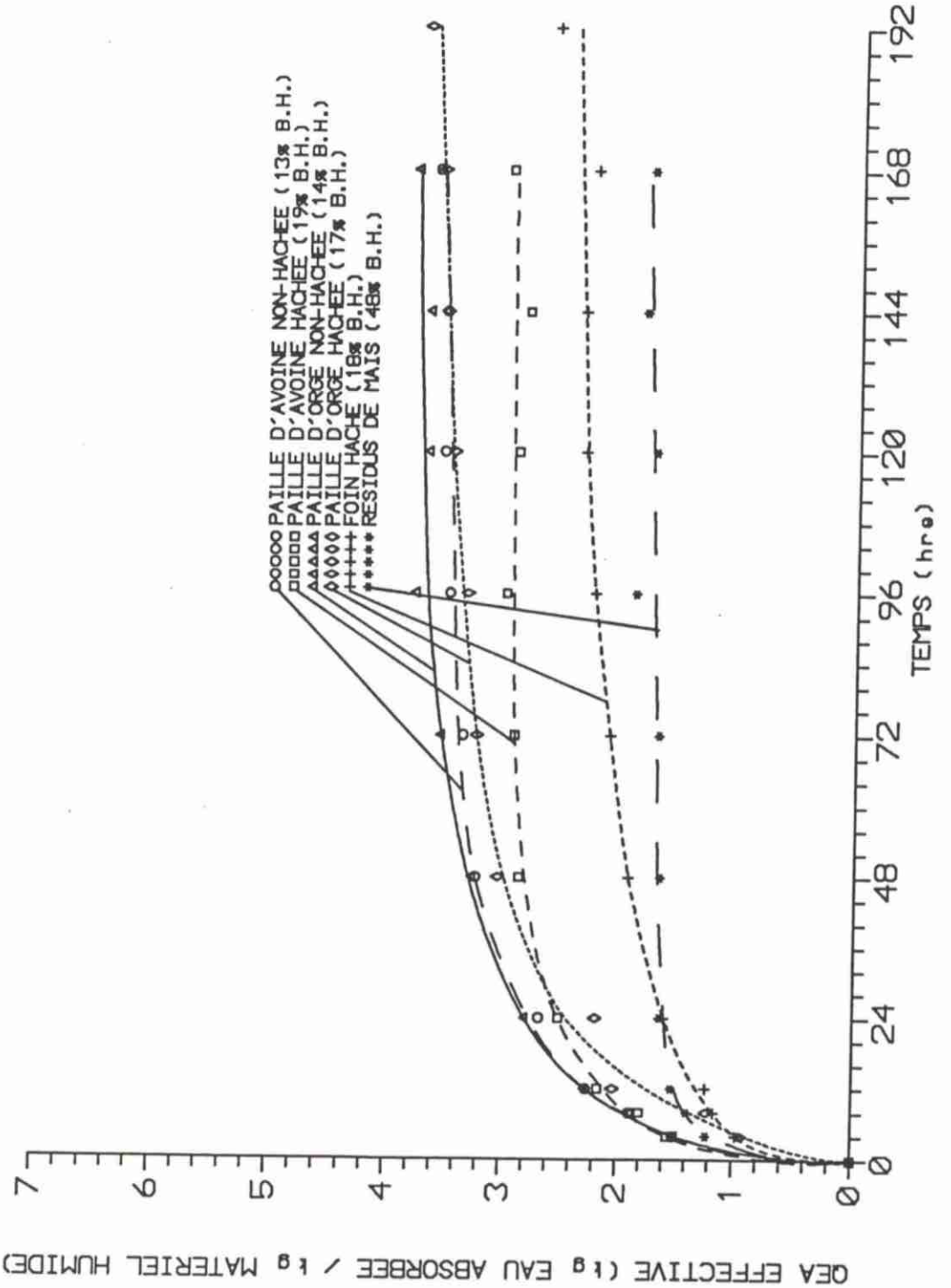



**Figure 2.1 : Quantité d'eau absorbée effective en fonction du temps pour la TEE b.h. indiquée**

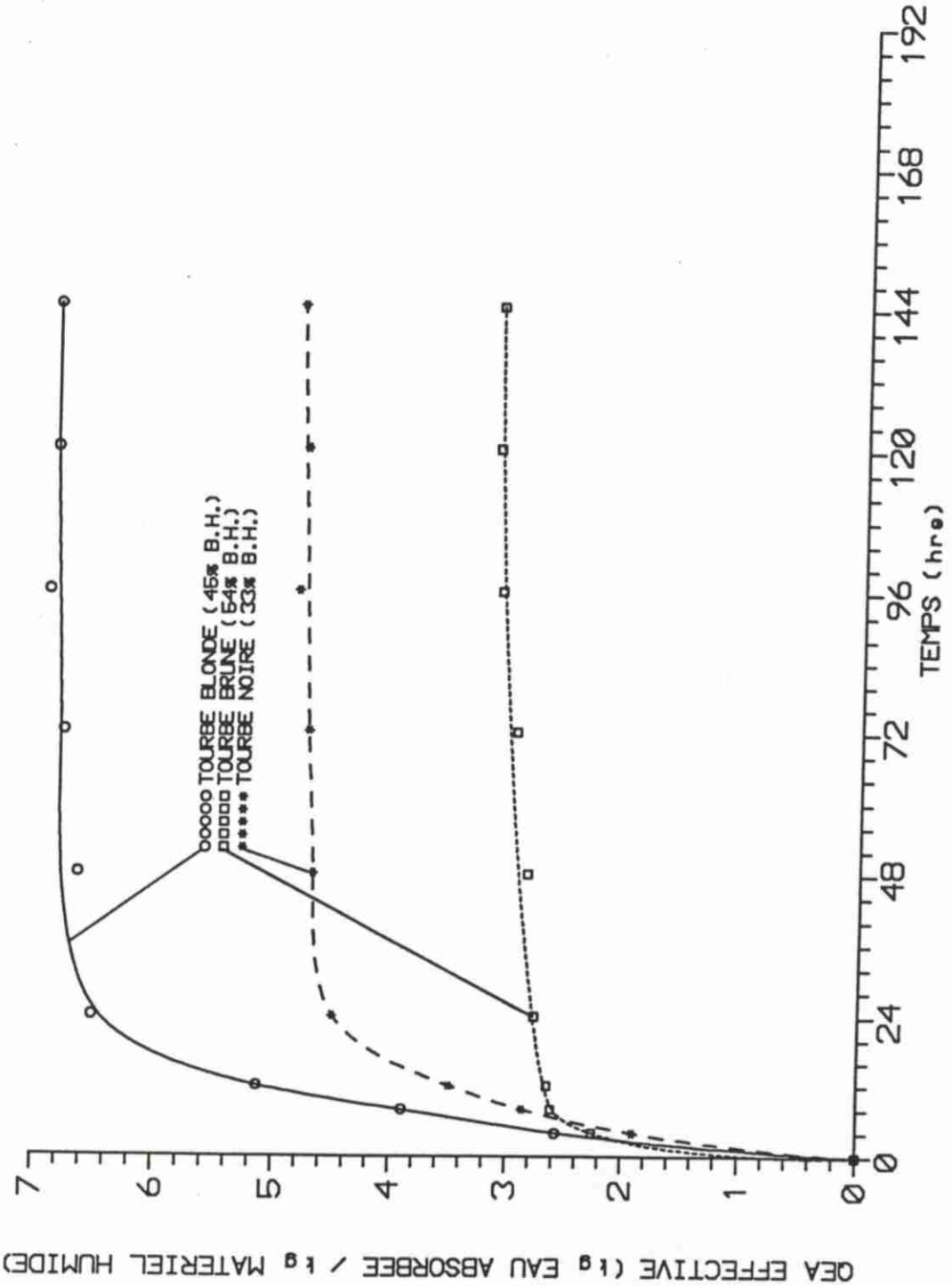



**Figure 2.2 : Quantité d'eau absorbée effective en fonction du temps pour la TEE b.h. indiquée**

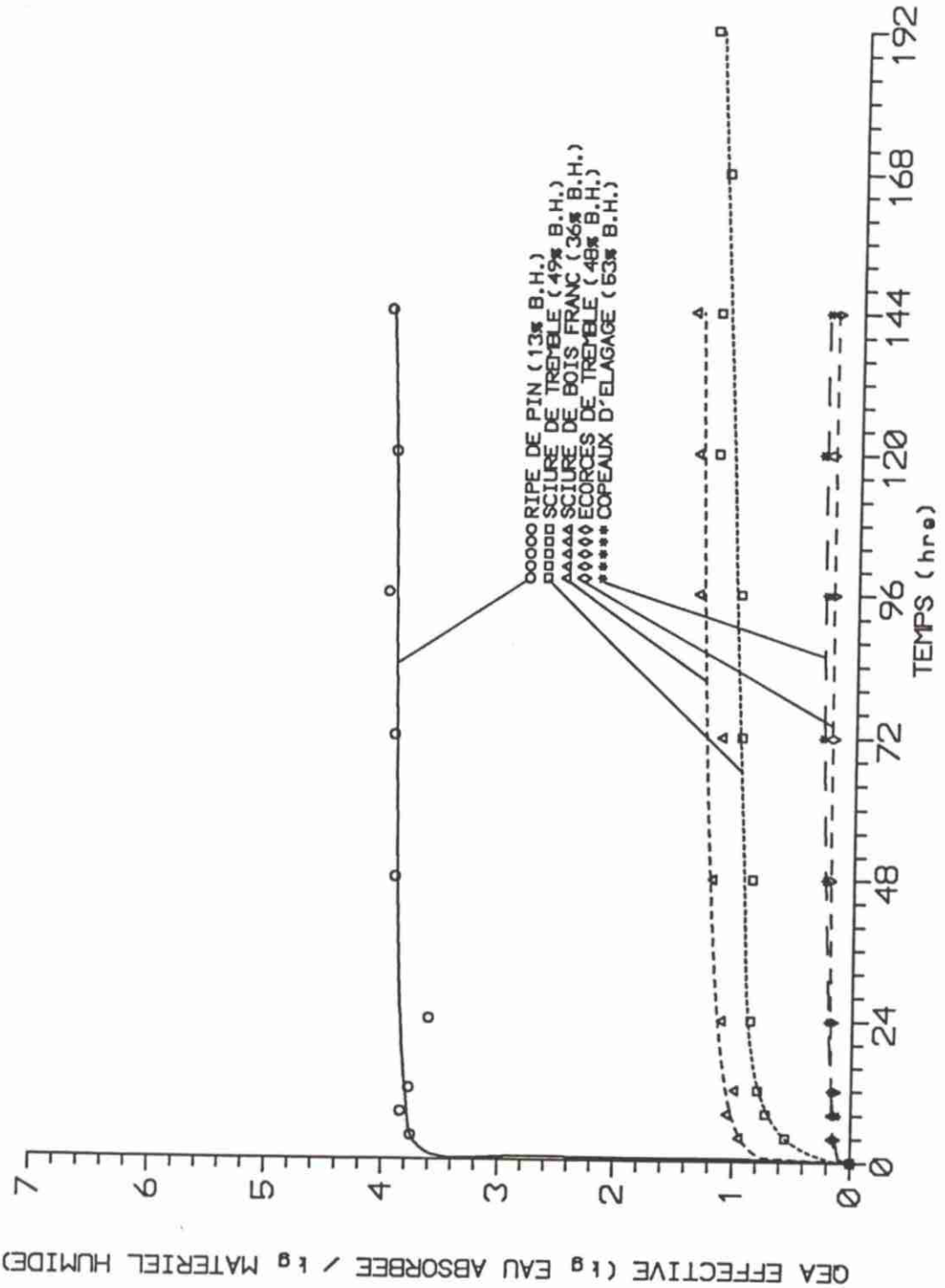



**Figure 2.3 : Quantité d'eau absorbée effective en fonction du temps pour la TEE b.h. indiquée**

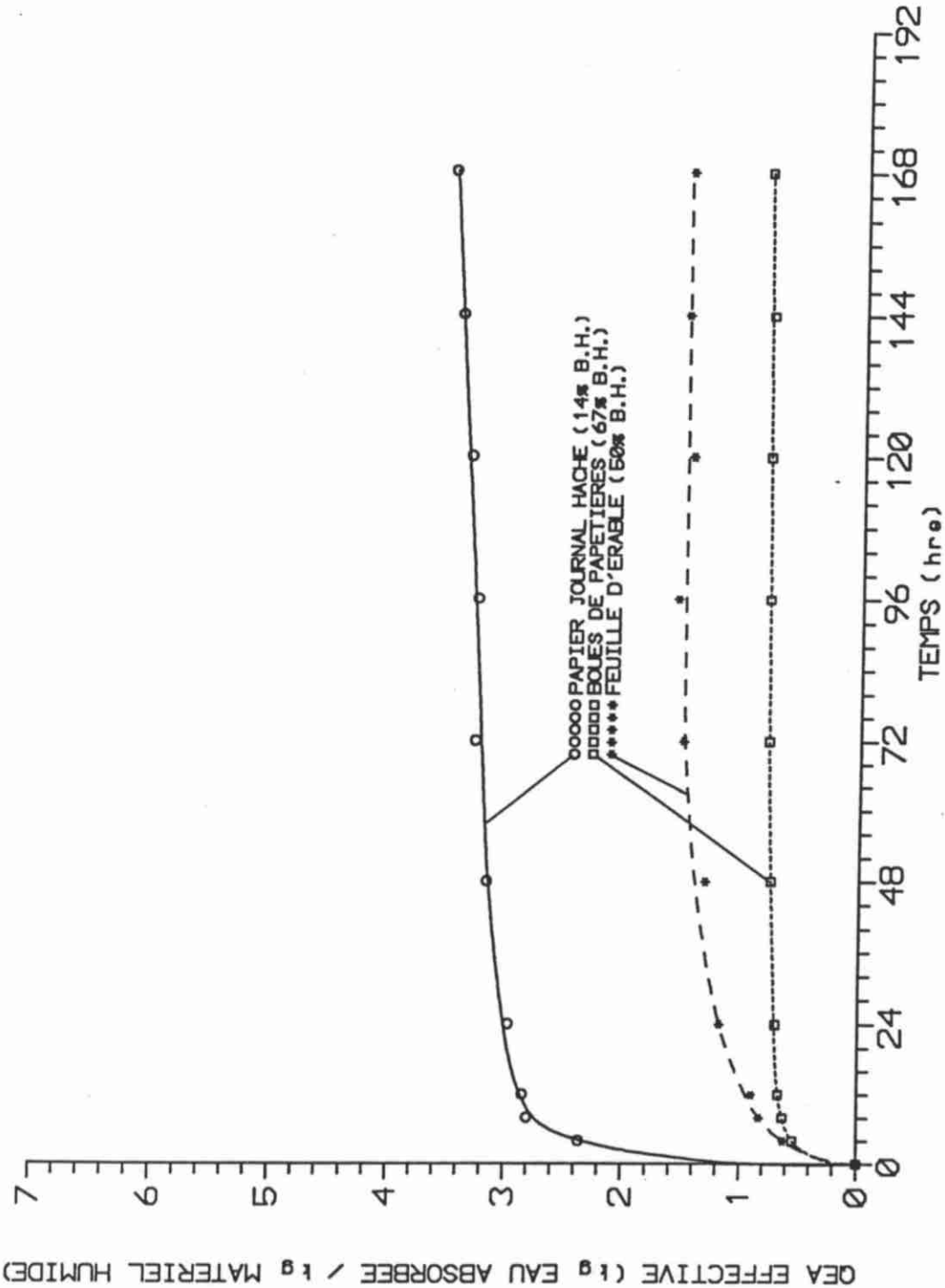



**Figure 2.4 : Quantité d'eau absorbée effective en fonction du temps pour la TEE b.h. indiquée**

La surface de contact entre les matériaux et le liquide étant optimale au laboratoire comparativement au dalot, les valeurs de QEA eff. du laboratoire ne sont pas directement transposables à la ferme laitière. Nous verrons au chapitre 3 comment se traduisent les résultats du laboratoire concernant l'utilisation des absorbants à la ferme.

On retrouve au tableau 2.5, les CAE en base sèche (TEE=0 %) et humide à des TEE fixées à un taux jugé représentatif pour chaque matériau. Bien qu'elles soient peu utiles en pratique, les CAE b.s. permettent de comparer le potentiel d'absorption théorique de chaque absorbant. La CAE sur une base volumique est également présentée dans le tableau 2.5.

On note par ordre décroissant, le potentiel d'absorption (CAE b.h.) des tourbes de sphaigne, de la ripe de pin, des pailles, du papier journal haché, du foin, des résidus de maïs, des sciures de bois, des boues papetières, des copeaux d'élagage et des écorces. Le classement diffère légèrement pour la CAE à TEE = 0 %. La CAE b.h. de la paille d'orge apparaît légèrement supérieure à celle de la paille d'avoine pour une TEE fixée à 15 %. En ce qui concerne la CAE des pailles hachées et non hachées, aucune différence marquée n'est obtenue. La CAE de la paille hachée est, pour l'avoine, légèrement inférieure à celle de la paille non hachée. Elle est égale pour les pailles d'orge. Il est à noter que les quatre types de paille provenaient de quatre fermes laitières différentes.

En connaissant la TEE b.h. réelle des matériaux, on peut établir leur CAE b.h. à l'aide des figures 2.5 à 2.8. Ces figures nous montrent l'importance de la TEE b.h. du matériel lorsqu'on veut établir sa véritable CAE b.h. Elles permettent de déterminer rapidement la quantité d'eau absorbable d'un matériau pour une TEE b.h. donnée.

Lorsque les absorbants saturés en eau sont soumis à une pression, l'eau absorbée est partiellement relâchée, ce qui se traduit par une diminution plus ou moins importante de la QEA eff. Le tableau 2.6 indique, pour diverses pressions, la masse d'eau qui demeure absorbée suite aux pressions exercées. La différence des valeurs entre chaque pression traduit l'aptitude des absorbants saturés à relâcher l'eau. En exprimant les résultats en QEA eff., on peut comparer les courbes d'absorption en eau avec celles de désorption suite à l'application des pressions.

## TABLEAU 2.5 : CAPACITÉ D'ABSORPTION EN EAU DES MATÉRIAUX

| MATÉRIAUX | CAE b.s. à TEE = 0 % kg eau absorbable / kg matériel sec | TEE b.h.fixée+ (%) | CAE b.h. à TEE fixée kg eau absorbable / kg matériel humide | CAE volumique à TEE fixée litre eau absorbable / litre matériel humide |
|---|---|---|---|---|
| Paille d'avoine | 4,30 | 15 | 3,51 | 0,049 |
| Paille d'avoine hachée | 3,89 | 15 | 3,16 | 0,052 |
| Paille d'orge | 4,57 | 15 | 3,73 | 0,057 |
| Paille d'orge hachée | 4,53 | 15 | 3,70 | 0,060 |
| Foin | 3,20 | 15 | 2,57 | 0,050 |
| Résidus de maïs | 4,36 | 50 | 1,68 | 0,062 |
| Tourbe blonde | 13,30 | 50 | 6,15 | 0,473 |
| Tourbe brune | 8,05 | 45 | 3,98 | 0,529 |
| Tourbe noire | 7,69 | 35 | 4,65 | 0,530 |
| Sciures de bois franc | 2,73 | 35 | 1,42 | 0,325 |
| Sciures de tremble | 3,34 | 50 | 1,17 | 0,222 |
| Ripe de pin | 4,66 | 10 | 4,09 | 0,398 |
| Écorces de tremble | 1,34 | 50 | 0,17 | 0,044 |
| Copeaux d'élagage | 1,74 | 50 | 0,37 | 0,067 |
| Papier journal haché | 4,08 | 15 | 3,32 | 0,056 |
| Boues de papetières | 4,43 | 65 | 0,90 | 0,270 |
| Feuilles d'érable | 4,03 | 50 | 1,52 | 0,022 |

+ : TEE fixée à une valeur jugée représentative.

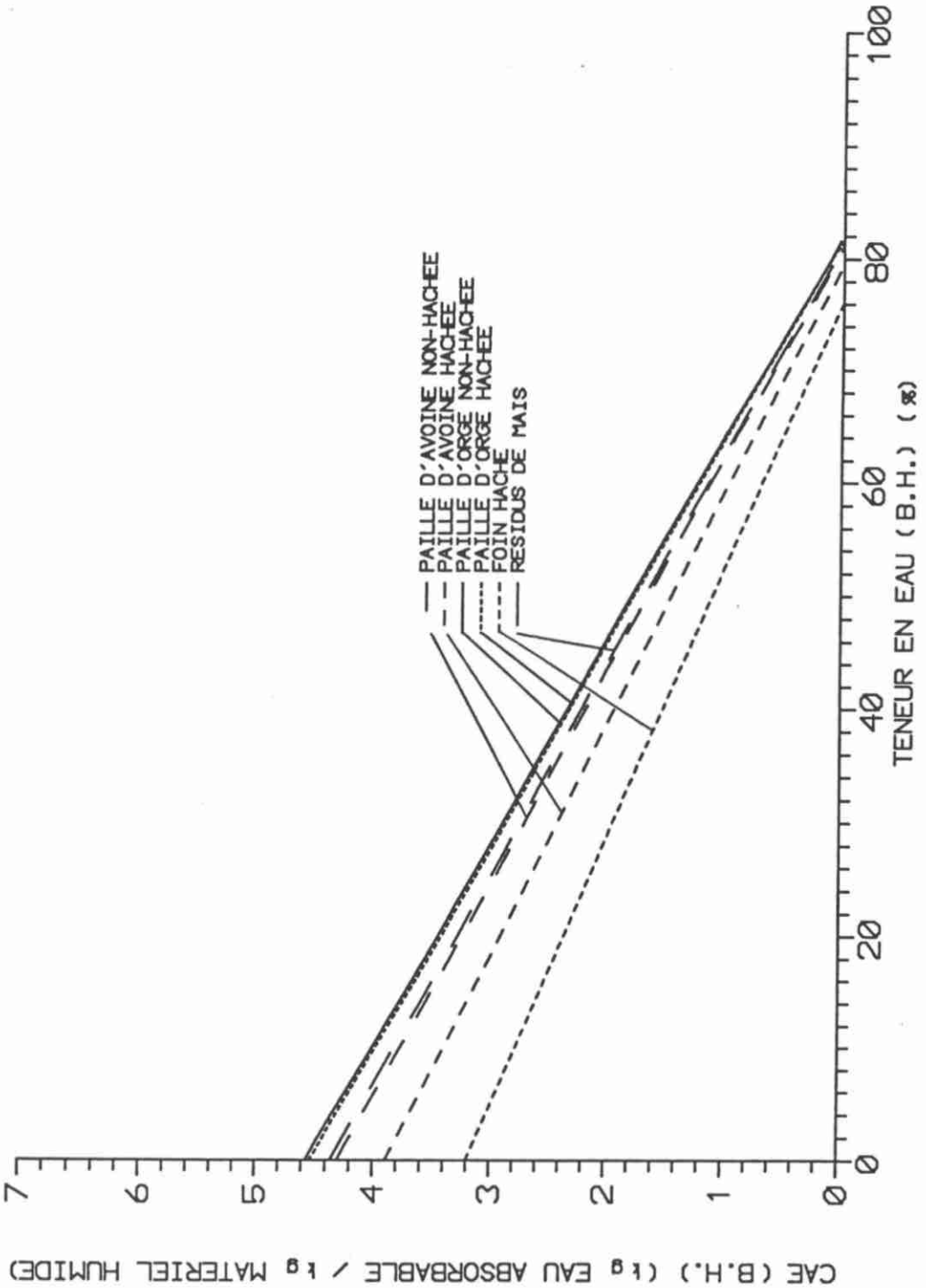



**Figure 2.5 : Capacité d'absorption en eau en fonction de la teneur en eau**

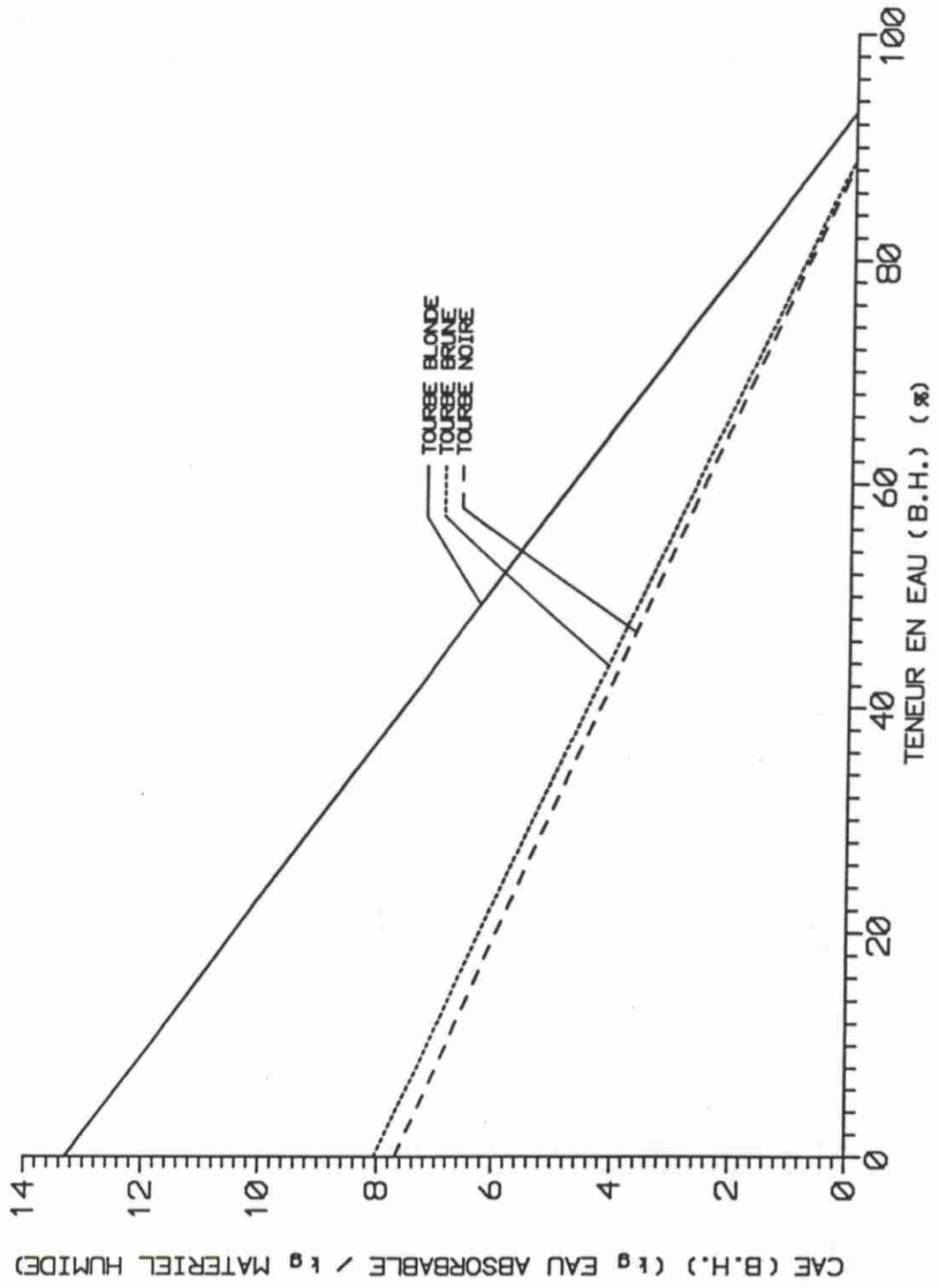



**Figure 2.6 : Capacité d'absorption en eau en fonction de la teneur en eau**

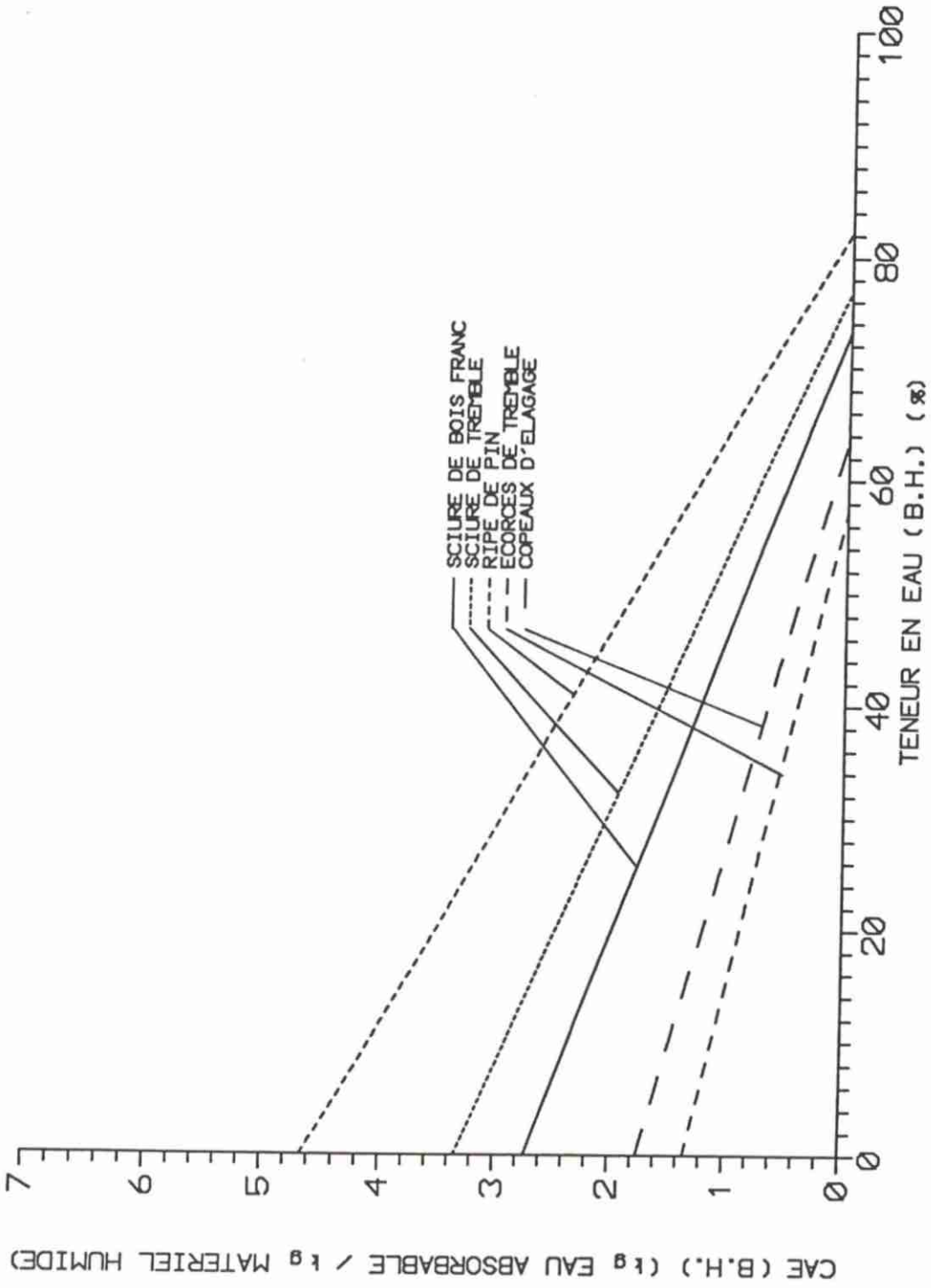



**Figure 2.7 : Capacité d'absorption en eau en fonction de la teneur en eau**

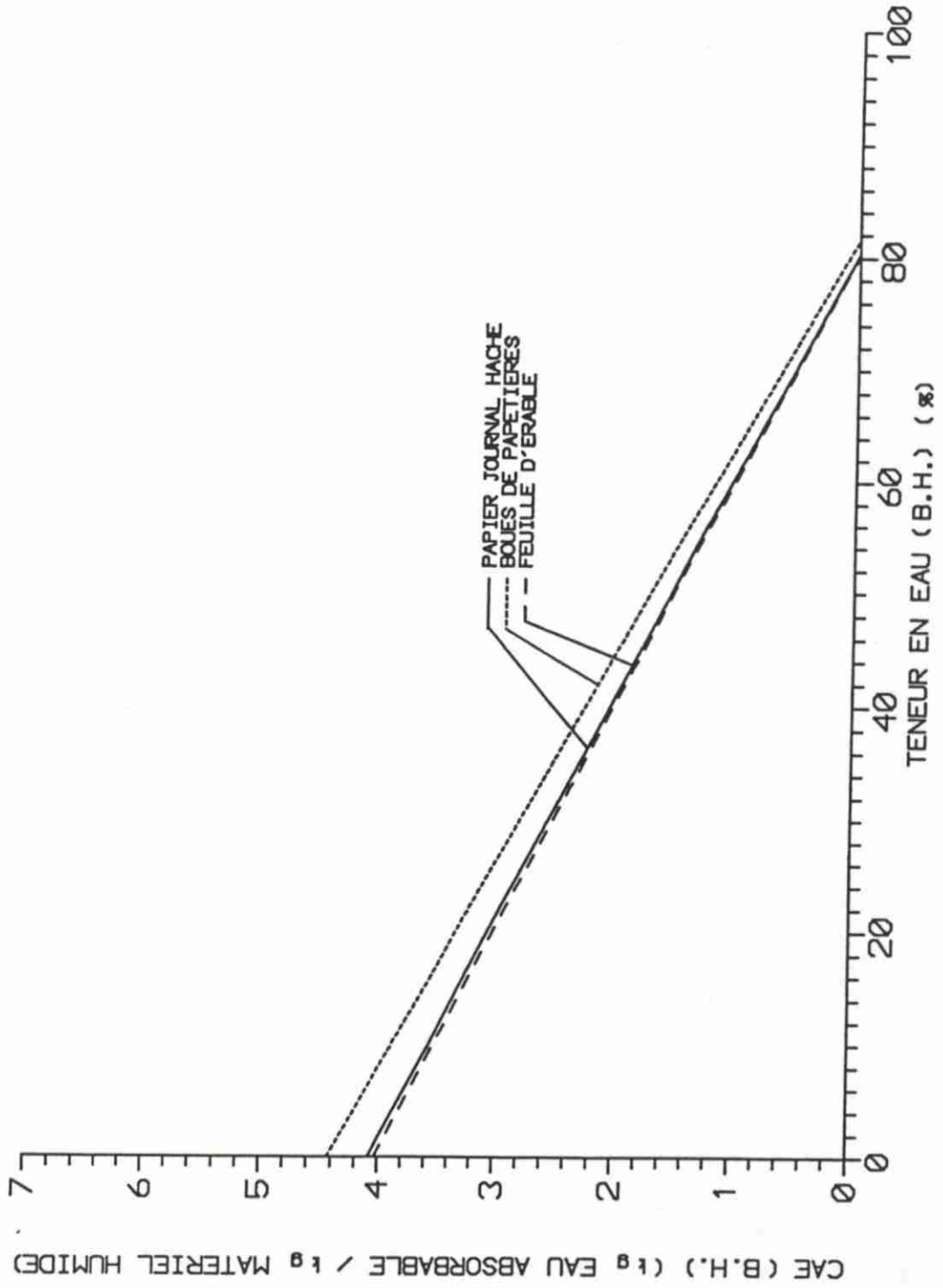



**Figure 2.8 : Capacité d'absorption en eau en fonction de la teneur en eau**

## TABLEAU 2.6 : EFFET DE LA COMPRESSION SUR LES PERTES EN EAU DES MATÉRIAUX

| MATÉRIAUX | QEA eff. (kg d'eau absorbée/ kg de matériel humide)+ PRESSION (kPa) | | | | Perte en eau ++ (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 12 | 24 | 36 | |
| Paille d'avoine | 3,70 | 3,65 | 3,60 | 3,20 | 13,5 |
| Paille d'avoine hachée | 2,80 | 2,80 | 2,70 | 2,20 | 21,4 |
| Paille d'orge | 3,35 | 3,30 | 3,30 | 2,70 | 19,4 |
| Paille d'orge hachée | 3,50 | 3,50 | 3,50 | 3,20 | 8,6 |
| Foin | 2,50 | 2,50 | 2,48 | 2,20 | 12,0 |
| Résidus de maïs | 1,40 | 1,40 | 1,38 | 1,15 | 17,9 |
| Tourbe blonde | 6,80 | 4,50 | 3,40 | 2,90 | 57,4 |
| Tourbe brune | 3,10 | 2,30 | 1,75 | 1,40 | 54,8 |
| Tourbe noire | 4,85 | 3,90 | 3,30 | 2,90 | 40,2 |
| Sciures de bois franc | 1,40 | 1,35 | 1,35 | 1,30 | 7,1 |
| Sciures de tremble | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 0,0 |
| Ripe de pin | 4,00 | 3,90 | 3,60 | 3,30 | 17,5 |
| Écorces de tremble | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,0 |
| Copeaux d'élagage | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,0 |
| Papier journal haché | 3,35 | 2,30 | 1,70 | 1,40 | 58,2 |
| Boues de papetières | 0,80 | 0,65 | 0,50 | 0,35 | 56,3 |
| Feuilles d'érable | 1,35 | 0,80 | 0,10 | 0,00 | 100,0 |

\+ matériel humide à TEE initiale (cf tableau 2.4)

++ perte en eau $= \frac{\text{QEA eff. à 0 kPa - QEA eff. à 36 kPa}}{\text{QEA eff. à 0 kPa}} \times 100$

### 2.5.3 EFFET DE LA COMPRESSION SUR LES CARACTÉRISTIQUES ABSORBANTES DES MATÉRIAUX

Les pertes en eau massiques résultant de l'application d'une pression de 36 kPa (théoriquement équivalente à une masse de fumier empilée sur 4,9 mètres de hauteur) ont été calculées. Ces pertes représentent la différence entre l'eau absorbée lorsque la pression appliquée sur le matériel est nulle et l'eau présente dans le matériel à une pression de 36 kPa. Les tourbes, le papier journal et les boues papetières ont perdu entre 40 % et 58 % de la quantité maximale d'eau absorbée; peu importe l'importance de la pression appliquée, il y a toujours une perte d'eau pour ces matériaux. Par ailleurs, la ripe de pin, les pailles et le foin ont perdu à une pression de 36 kPa entre 9 % et 21 % de la quantité maximale d'eau absorbée. Ces pertes se produisent principalement entre 24 et 36 kPa. Les sciures, les écorces et les copeaux ont conservé la quasi-totalité de l'eau absorbée et ce peu importe la pression appliquée. L'ensemble de ces résultats confirment les essais effectués par Peltola (1985).

Suite aux essais de compression et d'absorption, on remarque qu'un matériel peut absorber une quantité importante d'eau mais relâcher facilement cette eau sous une pression (effet éponge). Cela implique dans un contexte d'utilisation de litière à la ferme, qu'un matériel dont les pertes en eau par compression sont faibles, entraînera lors de l'entreposage en tas un risque de production de lixiviats plus faible.

Dans une optique de réduction de la production de lixiviats à la ferme, c'est donc le bilan global à l'absorption et à la compression qui servira au choix du matériel. De plus, d'autres critères entrent en ligne de compte lors du choix final (coût, disponibilité, etc.). Selon l'utilisation visée, le choix de l'absorbant sera différent. Par exemple, pour absorber rapidement du liquide, baisser la TEE du fumier et éviter les pertes de liquide par application d'une pression sur le matériel absorbant, la ripe de pin serait le meilleur matériel. Par contre, pour absorber le plus de liquide possible, la tourbe blonde serait le meilleur absorbant si de faibles pressions sont appliquées sur ce matériel à l'entreposage. Les pailles et le papier journal pourraient aussi représenter un excellent choix, si ces matériaux sont facilement disponibles à la ferme. Pour utiliser le papier journal, il faudra par contre s'assurer de l'absence de problèmes liés à la présence de l'encre contenu dans le papier; cet aspect n'ayant pas fait l'objet d'études dans le cadre du présent projet.

L'affaissement des litières soumis à une pression est une caractéristique importante à considérer dans la gestion des fumiers à la ferme. D'une part, la prédisposition d'un absorbant à un affaissement important influencera à la baisse le volume d'entreposage du mélange fumier-litière. D'autre part, l'utilisation au compostage d'une litière dont l'affaissement est faible serait préfèrable; l'emploi d'un tel matériel favorisera la

conservation d'une bonne structure et l'aération du compost si ce matériel est utilisé en quantité suffisante pour assurer une porosité adéquate.

L'affaissement de chacun des matériaux à l'étude en fonction de la pression appliquée se retrouve aux figures 2.9 à 2.12. Les pailles, le foin et les résidus de maïs ont des taux d'affaissement élevés (environ 80 % d'affaissement à 36 kPa). Les ripes, les sciures, les écorces et les copeaux sont les matériaux qui s'affaissent le moins (entre 30 % et 40 % d'affaissement à 36 kPa). L'affaissement des tourbes se situe à un niveau intermédiaire (environ 50 % d'affaissement à 36 kPa). L'affaissement des pailles, du foin, des résidus de maïs et des feuilles d'érable s'effectuent pour de faible pression (près de 50 % d'affaissement à 6 kPa) contrairement aux résidus de bois (ripe de pin, sciures, écorces et copeaux) dont l'affaissement est linéaire en fonction de la pression appliquée.

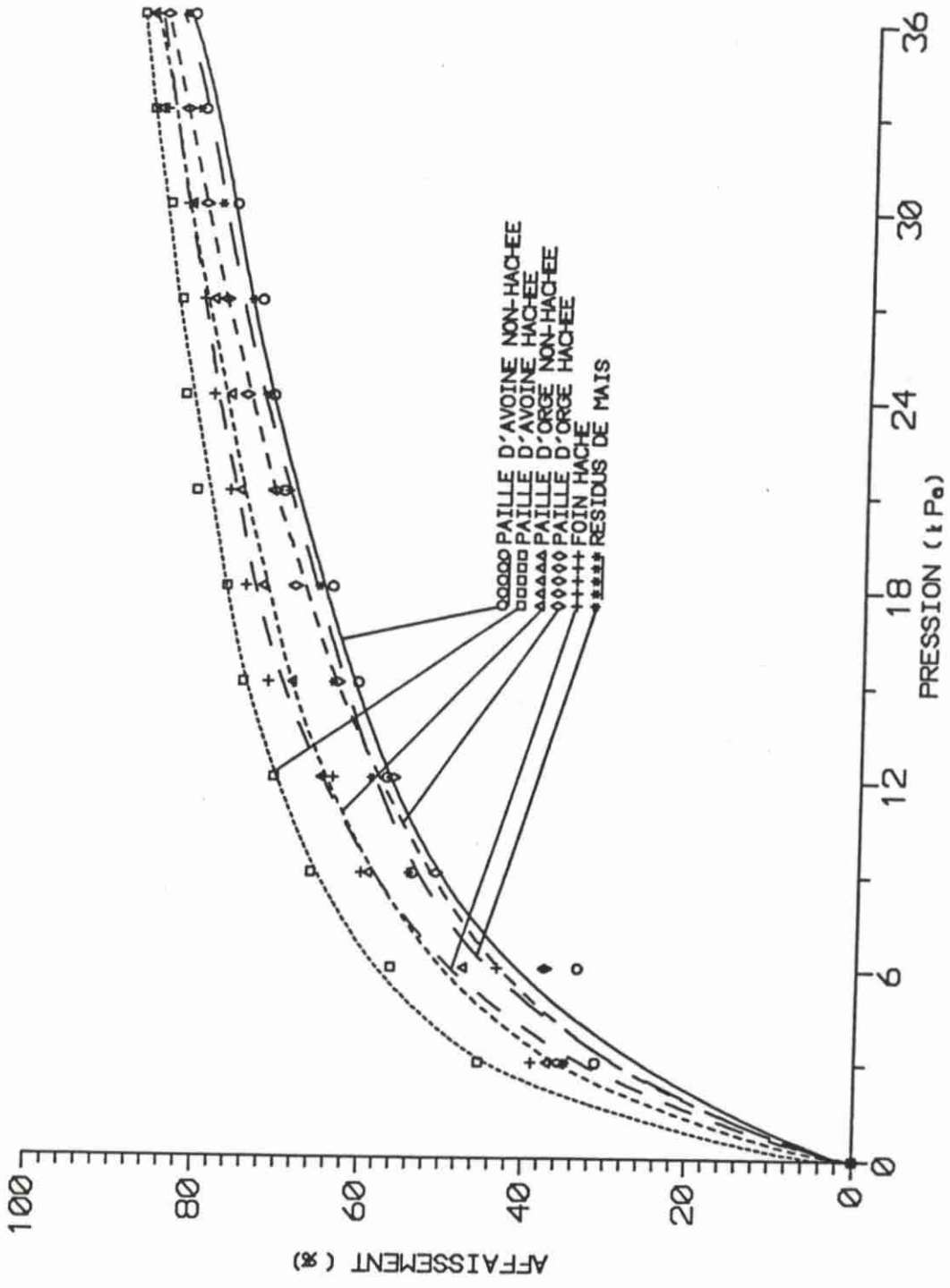



**Figure 2.9 : Affaissement en fonction de la pression**

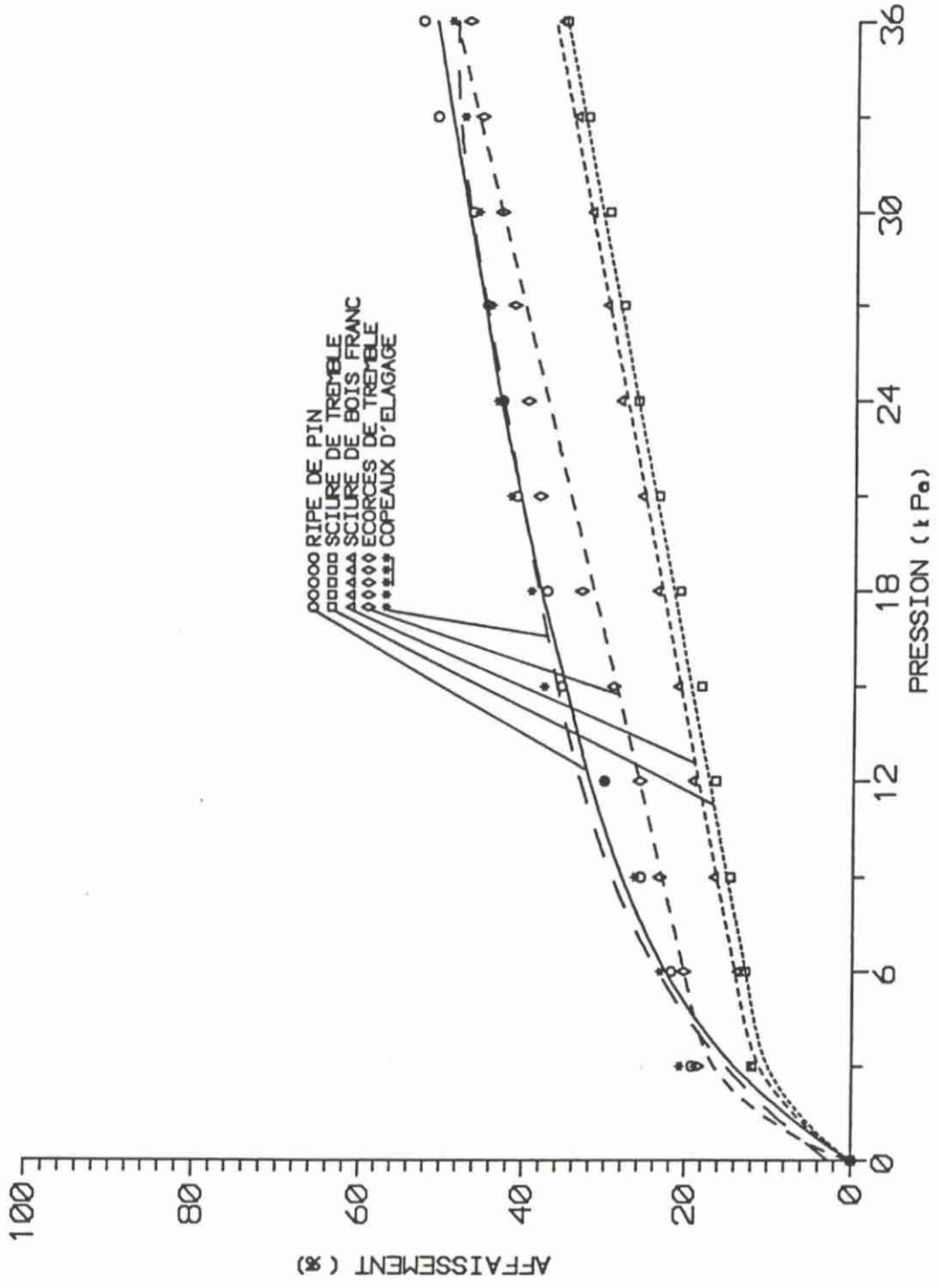



Figure 2.10 : Affaissement en fonction de la pression

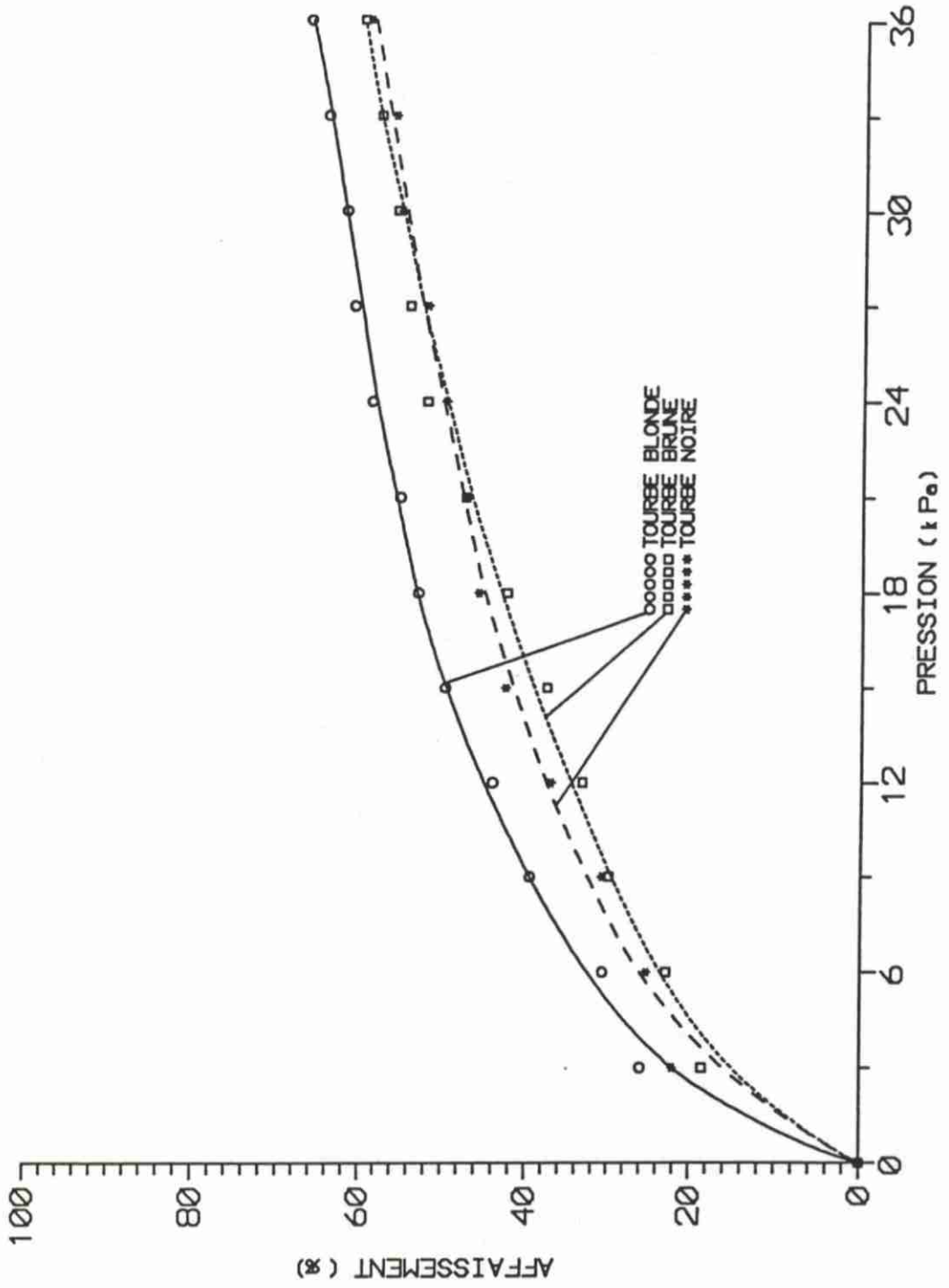



Figure 2.11 : Affaissement en fonction de la pression

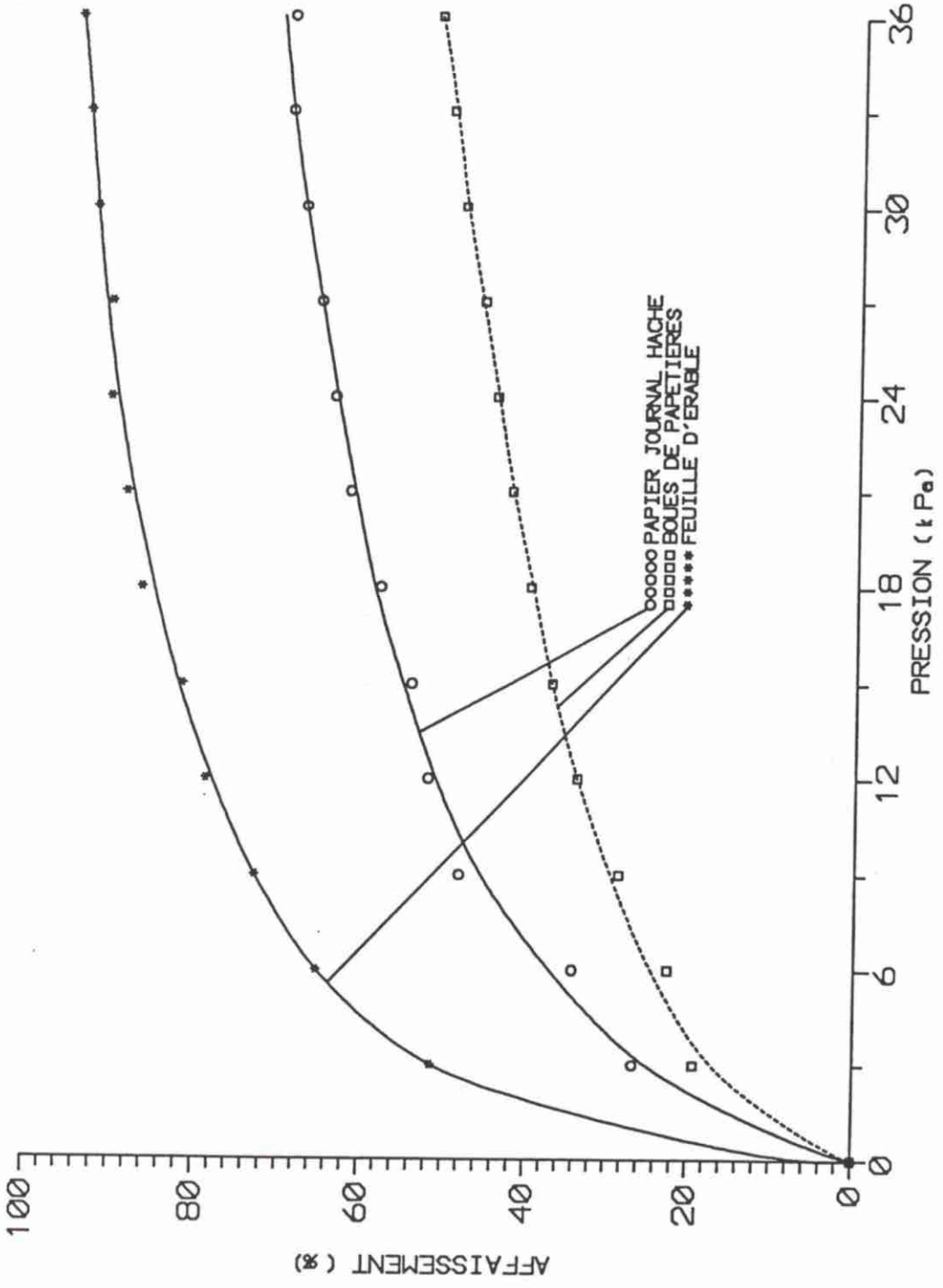



Figure 2.12 : Affaissement en fonction de la pression

## 2.5.4 COÛTS D'ABSORPTION EN EAU POUR DIVERS ABSORBANTS

Il s'avère intéressant de connaître le coût d'utilisation de chacun des absorbants employés comme litière à la ferme en fonction de leur potentiel d'absorption. Le coût d'absorption est fonction notamment du prix de l'absorbant. Ce prix varie d'une exploitation agricole à l'autre mais peut être établi précisément par chaque utilisateur. Plusieurs variables influencent le prix des litières à la ferme dont :

- rareté sur le marché;
- disponibilité du matériel directement à la ferme;
- coût pour le transport du matériel;
- facilité d'approvisionnement;
- coût d'entreposage.
- variabilité annuelle de la composition de la litière

En raison de ces nombreuses variables, il devient difficile d'établir un coût unique d'absorption pour les matériaux absorbants. La figure 2.13 présente le coût d'absorption en eau selon le prix à la tonne du matériel absorbant. Le coût d'absorption en ¢/10 kg d'eau absorbée est basé sur la CAE b.h. pour la TEE fixée b.h. indiquée au tableau 2.5. Il est à noter que ce type d'exercice suppose que le pouvoir absorbant est entièrement mis à profit, ce qui n'est pas toujours le cas à la ferme. Les calculs n'intègrent pas le temps pendant lequel l'absorbant est réellement en contact avec le liquide ni l'effet de la compression lorsque le matériel est empilé.

À titre d'exemple, un coût de tourbe blonde estimé à 180 $/t humide (7 $/ballot) entraînerait un coût de 30 ¢/10 kg d'eau absorbée alors que la paille d'avoine à 77 $/t humide (1,00 $/balle), entraîne un coût d'absorption de 24 ¢/10 kg d'eau absorbée. Si le prix de la paille double (2,00 $/balle), il devient plus économique d'utiliser la tourbe que la paille. Pour obtenir le même coût d'absorption que la tourbe, il faut payer la balle de paille 1,30 $. Des comparaisons économiques s'établissent entre différents matériaux disponibles et viennent ainsi éclairer le choix du type de litière à effectuer dans un contexte précis d'une ferme.

Pour pouvoir obtenir un coût d'utilisation réaliste pour les divers absorbants à la ferme, il faudrait effectuer des essais d'absorption-compression de divers types et taux de litières en mélange avec le fumier et des essais de lixiviation au compostage avec ces formulations de fumiers-litières et intégrer ces résultats à la chaîne de gestion des fumiers. L'intégration de ces résultats devrait aussi tenir compte des autres caractéristiques physiques et chimiques des absorbants à l'étude.

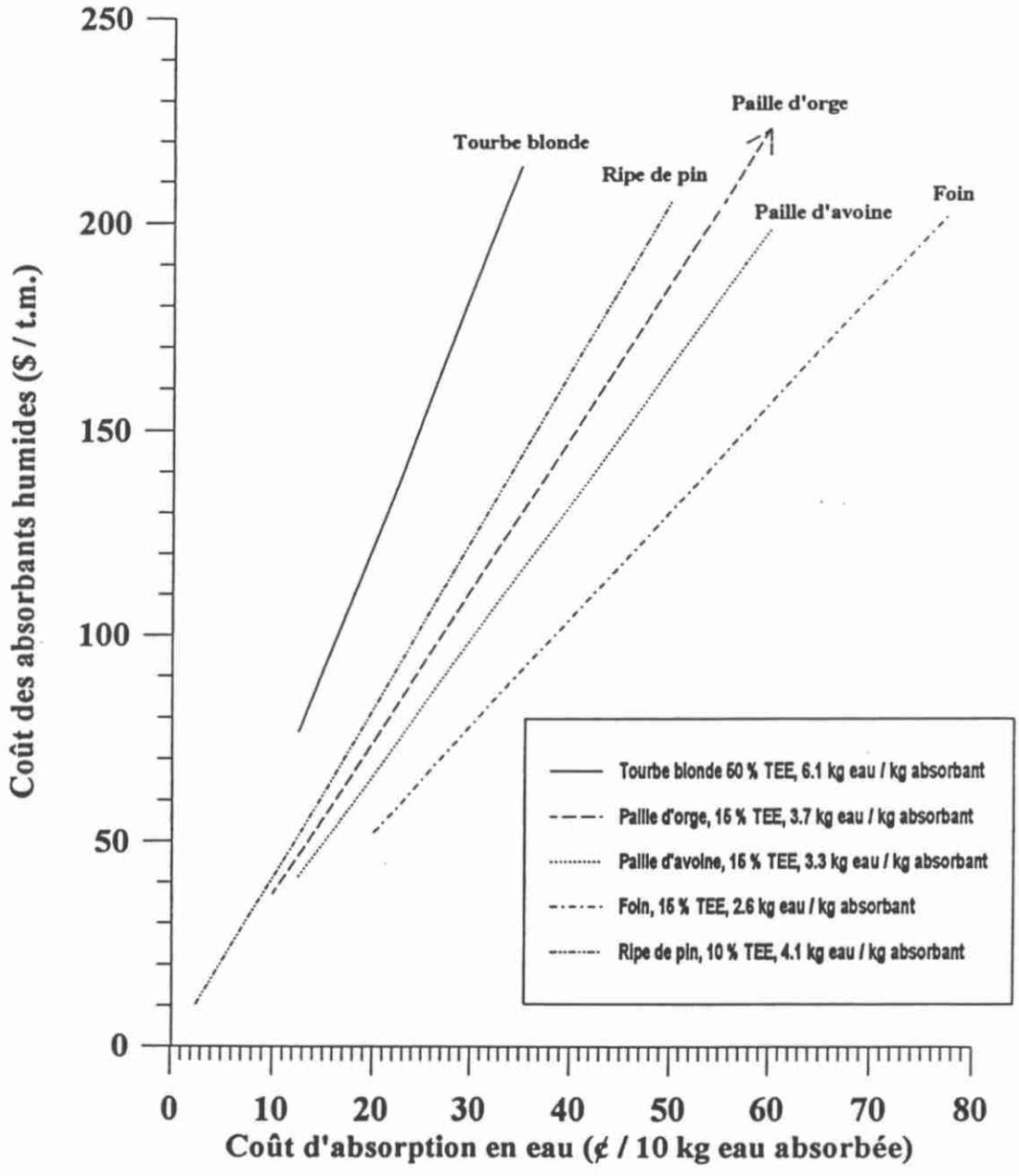



Figure 2.13 : Coût des absorbants humides en fonction du coût d'absorption en eau

## 2.6 CONCLUSION

Les teneurs en eau des absorbants disponibles au Québec varient considérablement d'un matériel à l'autre et dans certains cas, pour un même matériel. Pour cette raison, l'évaluation des CAE des matériaux doit se faire sur une base de litière humide. Sur une base de masse humide à TEE fixée et représentative, on note des valeurs décroissantes de CAE b.h. pour les matériaux suivants : les tourbes, la ripe de pin, la paille d'orge, la paille d'avoine, le papier journal et le foin. Le classement des absorbants est différent sur une base volumique. Par ordre décroissant, le classement des CAE vol. est le suivant : les tourbes, la ripe de pin, la sciure de bois franc, la boue papetière, la sciure de tremble et les pailles. En ce qui concerne la vitesse d'absorption, la ripe de pin s'est avérée être l'absorbant le plus efficace suivi de la tourbe blonde, du papier journal, des tourbes brunes et noires et des pailles.

La perte d'eau des absorbants lorsqu'ils sont soumis à des pressions, varie d'un matériel à l'autre. On note par ordre décroissant de pertes d'eau, les tourbes et le papier journal, les pailles et le foin et les résidus de bois. Pour certains matériaux comme les tourbes et le papier journal, la perte d'eau s'effectuera même si de faibles pressions sont appliquées. Pour d'autres matériaux, la perte d'eau s'effectuera à des pressions supérieures à 24 kPa (pailles, foin et résidus de maïs). Les pertes d'eau des litières à base de résidus de bois ne sont pas influencées par les pressions appliquées.

Selon l'utilisation visée, le choix de l'absorbant sera différent. Par exemple, pour absorber rapidement du liquide, baisser la TEE du fumier et éviter les pertes de liquide par l'application d'une pression sur le matériel absorbant, la ripe de pin serait le meilleur matériel pour accomplir ces tâches. Par contre, pour absorber le plus de liquide possible, la tourbe blonde serait le meilleur absorbant, si de faibles pressions sont appliquées sur ce matériel à l'entreposage. Les pailles et le papier journal pourraient aussi représenter d'excellents choix d'absorbants.

En plus des critères reliés à l'absorption (MVA b.h., TEE b.h. CAE, QEA eff.) et à la perte en eau par application d'une pression lorsqu'empilé, le choix final des absorbants et l'optimisation des quantités utilisées sur la ferme est fonction de plusieurs autres critères inhérents à la gestion des fumiers : autres caractéristiques physiques et chimiques (porosité, affaissement, rapport Carbone/azote, concentration en éléments majeurs et mineurs), coût d'acquisition, disponibilité, confort, propreté et sécurité des animaux, mode et fréquence d'évacuation du fumier, système d'entreposage solide et/ou liquide, utilisation du fumier frais et impact environnemental du compostage des fumiers en andain au champ.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Consultants BPR Inc. (1992). Communication personnelle.

Ensminger, M.E. (1980). Dairy Cattle Science, 2 e édition, p. 348.

Fortier, M. et Joncas, R. (1990). Densité et capacité d'absorption de diverses litières utilisées dans les bâtiments d'élevage. MAPAQ, Agdex 538, p. 23.

BIOREX, (1989). Le compostage du fumier à la ferme, Étude de faisabilité technico-économique et évaluation des impacts agronomiques et environnementaux. ACSI-BIOREX Inc. Québec, le ministère de l'Environnement, p. 275.

Nyronen, T. et Reinikainen, O. (1989). Some Applications of Peat in Waste Treatment. Dans: Proceedings Symposium'89: Peat and Peatlands, Diversification and Innovation, Vol. II. Québec, p. 214-217.

Peltola, I. (1985). Use of Peat as Litter for Milking Cow. Dans: Odour Prevention and Control of Organic Sludge and Livestock Farming. Edited by V.C. Nielsen, J.H. Voorburg, and P. L'Hermite, p. 181-187.

Reed, M.J. et McCartney, M.G. (1970). Physical Properties of Selected Litter Materials and Performance of Broiler Chickens. University of Georgia, College of Agriculture Experiment Stations, Research bulletin 75, 22 p.

Sobel, A.T., Ludington, D.C. et Kim Van Yow (1988). Altering Dairy Manure Characteristics for Solid Handling by the Addition of Bedding. International Agrophysics 4 (1-2): 31-48.

# CHAPITRE 3 : UTILISATION DES LITIÈRES À LA FERME

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE
INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

## 3.1 INTRODUCTION

L'utilisation de matériaux absorbants comme litière est une pratique rencontrée sur la quasi totalité des fermes laitières (BIOREX, 1989). Leur utilisation au dalot et sous les animaux vise l'atteinte des objectifs suivants :

- améliorer le confort, la propreté et l'hygiène des animaux;
- améliorer l'hygiène et la propreté de l'étable;
- absorber une partie de la fraction liquide des déjections;
- procurer une consistance solide au fumier.

La quantité de litière utilisée à la ferme varie d'une entreprise à l'autre selon l'objectif poursuivi par l'addition de litière, la catégorie d'animaux, le système d'évacuation en place et le contexte d'approvisionnement en litière. Au Québec, la quantité moyenne de litière utilisée (incluant copeaux, sciures, vieux foin et refus) pour l'ensemble des fermes laitières est d'environ 2,1 kg/vache laitière-j (BIOREX, 1989). La paille est le type de litière le plus fréquemment utilisé et elle est hachée dans 50 % des cas. La litière est mise sous les animaux en général au moins deux fois par jour (BIOREX, 1989).

Les critères d'admissibilité pour une subvention du PAAGF du ministère de l'Environnement en matière de compostage du fumier de bovins laitiers à la ferme sont actuellement basées sur une utilisation minimale de litière. Pour la ferme qui ne dispose pas de structure d'entreposage, l'utilisation minimale de 6 kg/u.a.-j d'absorbant est requise, dont une fraction au dalot. Pour celle dotée d'une structure d'entreposage d'une capacité de 200 jours et permettant la ségrégation du fumier et du purin et où les animaux sont en stabulation libre avec accumulation de litière, la quantité minimale requise est de 4 kg de litière/u.a.-j. De ces quantités, un minimum de 0,5 kg/u.a.-j d'un absorbant comme le bran de scie doivent être déposés dans le dalot.

Les exigences actuelles sont-elles suffisantes pour envisager de composter le fumier de bovins laitiers de façon respectueuse pour l'environnement ? À la lumière des résultats présentés au chapitre 2 et des travaux complémentaires effectués sur les fermes, le présent chapitre apporte certaines précisions sur l'utilisation des litières à la ferme, notamment en regard de leur pouvoir absorbant.

## 3.2 OBJECTIFS

L'objectif général de ce chapitre est d'analyser les avantages et les contraintes d'utilisation des litières comme absorbants dans le contexte pratique de gestion des fumiers et de compostage à la ferme. Les objectifs spécifiques sont :

- comparer l'absorption en eau et en urine de trois absorbants;
- déterminer le pouvoir absorbant de diverses quantités de paille utilisées dans le dalot afin d'établir les performances réelles des litières à la ferme;
- établir les quantités de litière nécessaires pour respecter les critères de compostage et les exigences environnementales.

## 3.3 DESCRIPTION DES TRAVAUX

Les travaux présentés dans ce chapitre sont regroupés en quatre sections. La première traite des essais d'absorption d'urine (liquide prélevé dans le dalot) qui ont été réalisés en laboratoire avec trois types d'absorbants. Ces essais visent à comparer le pouvoir absorbant en eau et en liquide du dalot.

Par la suite, l'estimation des quantités de litière que l'on doit ajouter aux fumiers afin d'optimiser les principaux paramètres de compostage est présentée. Les résultats des essais d'absorption au dalot, réalisés sur une ferme laitière avec diverses quantités de paille, sont présentés à la troisième section. La dernière section traite du coût et des limites d'utilisation de ces litières dans une optique de gestion solide des fumiers par compostage.

## 3.4 ESSAIS COMPARATIFS D'ABSORPTION EN EAU ET EN URINE DE TROIS TYPES D'ABSORBANTS

### 3.4.1 MÉTHODOLOGIE

La procédure utilisée pour la préparation des échantillons et les essais d'absorption en urine est identique à celle décrite au chapitre 2 pour les essais d'absorption en eau. Pour ces essais, le terme urine désigne les liquides récoltés dans le dalot à la ferme. Ces liquides sont représentatifs de ceux retrouvés habituellement dans le fond du dalot

à la ferme. Les matériaux absorbants à l'essai sont la ripe de pin, la paille d'orge non hachée et la tourbe blonde dont les caractéristiques ont été décrites au chapitre 2. Les essais d'absorption ont été répétés trois fois.

### 3.4.2 RÉSULTATS

Les essais d'absorption indiquent que la paille d'orge non hachée et la ripe de pin absorbent plus d'eau que d'urine. L'inverse est observé pour la tourbe blonde. Les résultats d'absorption en eau et en urine pour ces trois matériaux sont présentés au tableau 3.1.

**TABLEAU 3.1 : CAPACITÉ D'ABSORPTION EN EAU ET EN URINE**

| Matériaux | CAE b.s. à TEE = 0 % (kg liquide absorbable/kg matériel sec) | |
|---|---|---|
| | Eau | Urine |
| Paille d'orge | 4,57 | 3,99 |
| Ripe de pin | 4,66 | 4,01 |
| Tourbe blonde | 13,30 | 14,61 |

La quantité d'urine absorbable par kg de litière sèche (capacité d'absorption) est 15 % plus faible pour la paille, et 16 % plus faible pour la ripe. La tourbe blonde a absorbé 9 % plus d'urine que d'eau. Ces données confirment les résultats obtenus par Peltola (1985). Les faibles différences observées nous permettent de croire que l'absorption de l'eau et du liquide du dalot est à toute fin pratique comparable. Ceci justifie l'emploi des données d'absorption obtenues avec de l'eau pour prédire la quantité de liquide du dalot absorbée selon divers scénarios.

## 3.5 QUANTITÉS DE LITIÈRE REQUISES

Dans une optique de compostage à la ferme, l'utilisation de la litière doit permettre d'optimiser les paramètres du compostage notamment pour l'humidité, la porosité et le rapport C/N. Pour certains, le compostage représente une technique de gestion

des fumiers solides qui permettrait d'éliminer totalement la production de liquides par l'utilisation importante de litière. Des doses aussi élevées que 6 kg de paille/u.a.-j sont utilisées sur certaines fermes. Les sections qui suivent visent à mettre en lumière les caractéristiques initiales des fumiers et les valeurs optimales recherchées pour le compostage du fumier comme substrat à composter.

### 3.5.1 ABSORPTION DES LIQUIDES ET TENEUR EN EAU DU FUMIER

On détermine la quantité de litière nécessaire pour absorber toute l'urine à l'aide de la capacité d'absorption en eau de la litière. La quantité de litière nécessaire pour obtenir une TEE du fumier de 70 et 75 % est calculée en considérant la TEE initiale des matériaux absorbants. Ces calculs s'appuient sur les caractéristiques du fumier précédemment présentées en hypothèses à la section 1.5. Ils ne tiennent pas compte ni des quantités d'eau supplémentaires qui pourraient s'ajouter au fumier (ex. : précipitations et eaux de laiterie), ni des pertes par évaporation et lixiviation à l'entreposage. Les résultats de cet exercice sont présentés au tableau 3.2.

La colonne «TEE du fumier» indique la teneur en eau du mélange fèces, urine et litière lorsque l'urine est théoriquement absorbée en totalité par la litière et que cette dernière est saturée. Une quantité minimale de paille de 3,2 kg/u.a.-j serait requise, pour des temps et des conditions maximales d'absorption, si la totalité de l'urine produite à l'étable par les animaux étaient absorbés. La TEE b.h. d'un fumier à base de paille ainsi produit serait d'environ 81 %. Elles correspondent aux valeurs moyennes d'humidité observées pour les fumiers entreposés (Antoun, 1983). Des valeurs similaires de TEE du fumier sont obtenues pour la majorité des matériaux étudiés.

Ces TEE apparaissent très élevées pour envisager le compostage des fumiers de bovins laitiers. D'une part, le contenu en eau élevé réduit considérablement la porosité du fumier ce qui favorise l'anaérobiose du matériel. D'autre part, la production de lixiviats apparaît inévitable lorsque le fumier est saturé en eau. Même si les quantités de litière utilisées permettent l'absorption complète des urines, le fumier (fèces, urine et litière) ainsi obtenu ne permet pas en pratique d'éliminer la production de liquides produits par empilement lors de l'entreposage, à cause de sa forte teneur en eau.

Les résultats obtenus à ce jour nous permettent de croire qu'une teneur en eau d'environ 70 % représente un objectif réaliste à respecter pour conduire, sous des conditions environnementalement adéquates, des opérations de compostage à la ferme. (cf. chapitre 4). À cette humidité, la production de lixiviats en cours de compostage serait à toute fin pratique nulle s'il n'y avait pas d'apports d'eau par précipitation.

Pour rencontrer cette condition (TEE = 70 %), les quantités de litière théoriquement requises sont présentées au tableau 3.2. Les besoins en paille pour atteindre cette condition seraient d'environ 15 kg/u.a.-j. Cette valeur (15 kg de paille/u.a.-j) traduit bien la problématique à laquelle fait face la pratique actuelle du compostage des fumiers de bovins laitiers à la ferme. Des utilisations de 6 kg de litière/u.a.-j sont déjà considérées comme très importantes.

Même pour des matériaux très absorbants tels que la tourbe, la quantité requise pour abaisser l'humidité du fumier sous 70 % demeure importante; plus de 20 kg de tourbe/u.a.-j seraient nécessaires.

Pour obtenir une teneur en eau du fumier de 75 %, les besoins de litière sont moindres mais demeurent importants ($\simeq$ 10 kg de paille/u.a.-j).

Plutôt que d'établir une quantité de paille qui autoriserait le compostage du fumier sans production de liquides, il apparaît intéressant de tenir compte de la teneur en eau du fumier avant le compostage pour évaluer le risque d'écoulement de lixiviat par drainage naturel du fumier.

## TABLEAU 3.2 : RELATION ENTRE LES QUANTITÉS D'ABSORBANT ET LA TENEUR EN EAU DU FUMIER

| MATÉRIAUX | TEE b.h. (%) | ABSORPTION THÉORIQUE DE LA TOTALITÉ DES URINES | | TENEUR EN EAU DU FUMIER b.h. | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Quantité de litière (kg/u.a.-j) | TEE b.h. du fumier (%) | 70 % | 75 % |
| | | | | Quantité de litière (kg/u.a.-j) | |
| Paille d'avoine | 15 | 3,4 | 81,5 | 14,9 | 9,8 |
| Paille d'avoine hachée | 15 | 3,8 | 81,0 | 14,9 | 9,8 |
| Paille d'orge | 15 | 3,2 | 81,7 | 14,9 | 9,8 |
| Paille d'orge hachée | 15 | 3,2 | 81,7 | 14,9 | 9,8 |
| Foin | 15 | 4,7 | 79,9 | 14,9 | 9,8 |
| Résidus de maïs | 50 | 7,1 | 81,5 | 40,9 | 23,5 |
| Tourbe blonde | 50 | 1,9 | 84,7 | 40,9 | 23,5 |
| Tourbe brune | 45 | 3,0 | 83,7 | 32,7 | 19,6 |
| Tourbe noire | 35 | 2,6 | 83,5 | 23,4 | 14,7 |
| Sciures de bois franc | 35 | 8,5 | 78,6 | 23,4 | 14,7 |
| Sciures de tremble | 50 | 10,3 | 79,9 | 40,9 | 23,5 |
| Ripe de pin | 10 | 2,9 | 81,8 | 13,6 | 9,0 |
| Écorces de tremble | 50 | 70,6 | 64,9 | 40,9 | 23,5 |
| Copeaux d'élagage | 50 | 32,4 | 71,8 | 40,9 | 23,5 |
| Papier journal haché | 15 | 3,6 | 81,2 | 14,9 | 9,8 |
| Boues de papetières | 65 | 13,3 | 81,6 | 163,6 | 58,8 |
| Feuilles d'érable | 50 | 7,9 | 81,1 | 40,9 | 23,5 |

Hypothèses :
- production quotidienne de 49 kg/u.a.-j de déjections;
- TEE b.h. du mélange fèces/urine de 87 %;
- production quotidienne d'urine de 12,3 kg/u.a.-j;
- TEE b.h. fixée des litières et CAE b.h. décrites tableau 2.5.
- Le fumier ne subit pas de pression, n'est pas soumis aux précipitations et le contact entre le fumier et l'absorbant est suffisant

## 3.5.2 QUANTITÉS DE LITIÈRE ET POROSITÉ DU FUMIER

La porosité d'un compost est une propriété physique découlant de la structure du matériel. Elle s'exprime en pourcentage par unité de volume du compost occupé par l'air. Dans le cadre du présent projet, le terme porosité ne réfère pas à la porosité totale du compost. Le terme porosité de drainage utilisé dans ce rapport correspond au volume d'air dans le compost à la suite d'une période d'égouttement du compost d'une heure. On la détermine en mesurant le volume d'eau qui s'écoule librement des macropores du compost préalablement saturé. Ce type de porosité est également appelé macroporosité ou porosité d'aération.

Le terme porosité effective correspond au pourcentage volumique d'air effectivement présent dans le compost. Elle varie en fonction de la teneur en eau du matériel. La porosité effective d'un compost à une teneur en eau (TEE) donnée, a été calculée à partir de la porosité de drainage en considérant la teneur en eau du compost après égouttement. La masse d'eau impliquée entre la TEE après égouttement et une TEE donnée, a été transformée en volume d'air qui s'additionne à celui obtenu de la porosité de drainage.

### 3.5.2.1 Méthodologie

Des analyses de porosité ont été effectuées sur des fumiers reconstitués en laboratoire pour différentes quantités de litière. Les hypothèses de calcul alors disponibles établissaient la proportion fèces/urine à un rapport de 80/20. Des teneurs en eau des fèces de 84,3 % et de l'urine de 96 % ont été retenues comme hypothèse. La proportion de paille nécessaire au mélange fèces/urine a été ajoutée en considérant une production quotidienne de déjections de 50 kg/u.a.-j. Les analyses de porosité ont été faites pour des doses de paille d'orge non hachée de 0, 2, 4, 6 et 8 kg/u.a.-j en mélange avec les fèces et l'urine.

Les résultats de porosité obtenus en laboratoire ne tiennent pas compte de la pression exercée sur le matériel lors de l'empilement de ce dernier. Pour cette raison, la porosité effective du fumier ou du compost disposé en tas ou en andains serait inférieure à la valeur obtenue en laboratoire.

### 3.5.2.2 Résultats

La figure 3.1 présente les résultats des analyses de porosité du fumier non comprimé effectuées en laboratoire. La porosité effective du fumier (mélange de paille, fèces et urine) et sa teneur en eau correspondante y sont présentées pour diverses quantité de paille ajoutées aux déjections. On constate que, pour une teneur en eau fixée, la porosité du fumier augmente avec l'augmentation des quantités de paille.

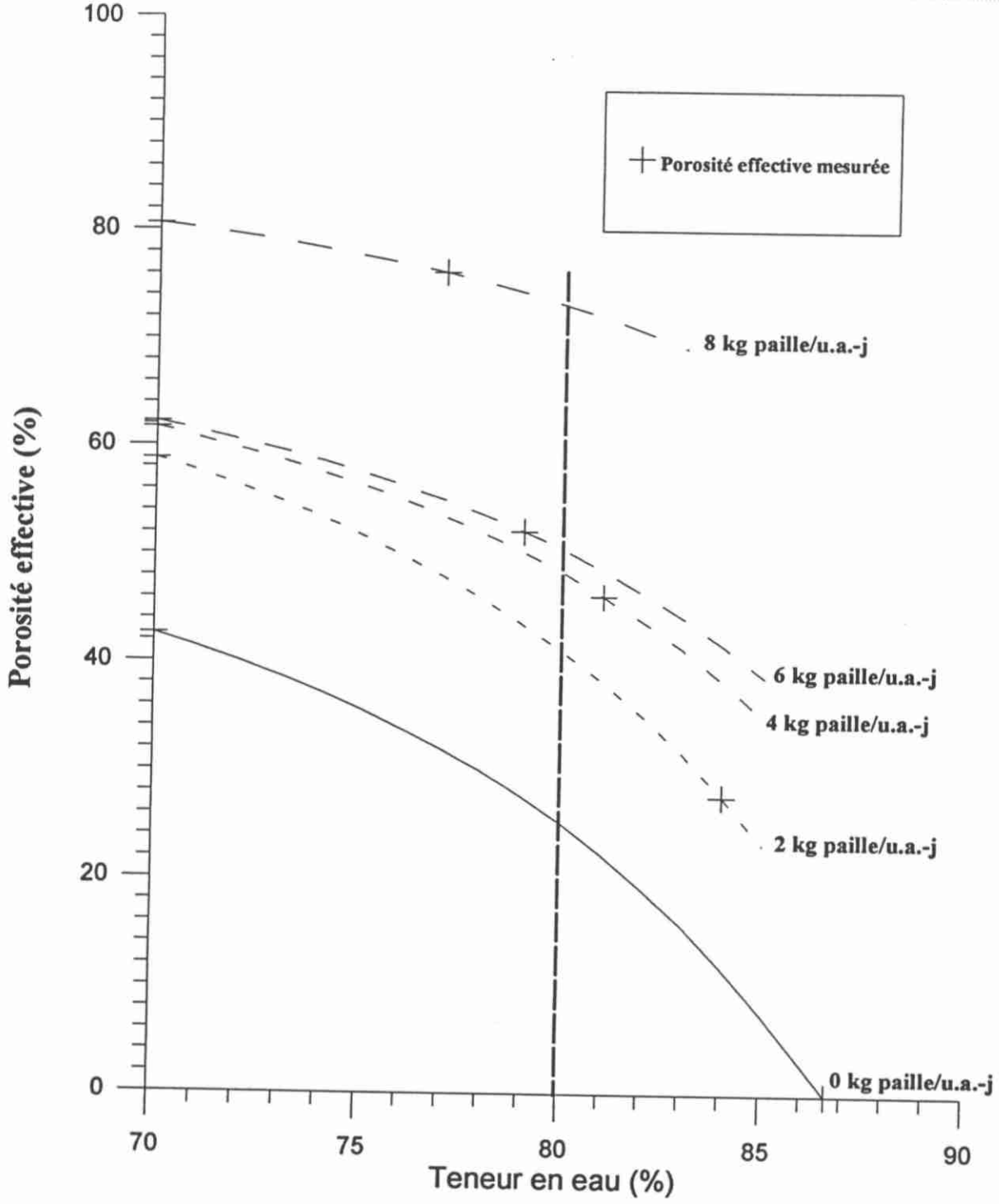



Figure 3.1 : Relation entre la porosité effective où du fumier non comprimé et la teneur en eau b.h. pour diverses quantités de paille

En l'absence de compression, une quantité de paille supérieure à 4 kg/u.a.-j permet de rencontrer le critère de porosité établie par Jeris (1973) qui stipule que la zone de porosité acceptable lors des premières phases du compostage se situe entre 30 et 36 % pour la plupart des matériaux à composter. Ces valeurs sont atteintes avec plus de 4 kg de paille/u.a.-j et pour des teneurs en eau inférieures à 85 %. Pour une utilisation minimale de 2 kg de paille/u.a.-j, la porosité effective d'un fumier non comprimé serait adéquate si la teneur en eau était inférieure à 82%. En pratique cependant, la mise en andain ou en tas du fumier lors du compostage réduit la porosité effective du mélange en raison de la compression exercée lors de l'empilement.

Pour une teneur en eau du fumier de 80 % (TEE moyenne du fumier à l'entreposage), la porosité effective du fumier non comprimé obtenue avec l'utilisation de 4 kg de paille/u.a.-j serait d'environ 50 %. Les essais de compostage réalisés avec cette quantité de paille (cf chapitre 4) indiquent un déroulement adéquat des processus de compostage. Une porosité effective d'un fumier sans compression de 50 % pourrait également être atteint avec l'utilisation de 2 kg de paille seulement si la teneur en eau du fumier était inférieure à 76 %.

### 3.5.3 QUANTITÉS DE LITIÈRE ET RAPPORT C/N DU FUMIER

Le tableau 3.3 indique la quantité théorique de litière à ajouter au fumier pour augmenter le rapport C/N. Ces calculs sont basés sur les caractéristiques du fumier décrites au chapitre 1 à la section 1.5 et sur les propriétés des litières décrites au chapitre 2 (tableau 2.2, 2.3 et 2.5). On déduit que la quantité de paille d'avoine nécessaire pour augmenter le rapport C/N à 30 (11,7 kg de paille/u.a.-j) est inférieure à celle requise pour diminuer la TEE de cette dernière à 70 % (14,9 kg/u.a.-j). Pour la paille d'orge, la quantité requise pour rencontrer ces deux conditions est d'environ 15 kg/u.a.-j.

Des matériaux comme la ripe de pin ou le papier journal permettent d'utiliser moins de 8,0 kg/u.a.-j de litière pour obtenir un fumier dont le C/N serait de 30. Cette dose de litière (8,0 kg/u.a.-j) ne permet toutefois pas l'obtention d'un fumier dont l'humidité est inférieure à 70 %. Pour rencontrer ce critère, il faudrait 14,9 kg de papier journal/u.a.-j et 13,6 kg de ripe de pin/u.a.-j.

En considérant la masse volumique apparente des litières (tableau 2.1) et du fumier (à 750 kg/m³), on constate qu'une quantité de 8,0 kg/u.a.-j représente un volume de litière légèrement inférieur au volume de fumier (fèces + urine) produit quotidiennement par les animaux pour la majorité des matériaux à l'étude. Le volume de litière à manipuler est alors presqu'aussi important que le volume du fumier.

## TABLEAU 3.3 : MASSE DE LITIÈRE REQUISE POUR AUGMENTER LE C/N DU FUMIER

| MATÉRIAUX | MASSE DE LITIÈRE À AJOUTER AUX DÉJECTIONS POUR EN AUGMENTER LE RAPPORT C/N (kg/u.a.-j) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | RAPPORT C/N DU FUMIER | | | |
| | 15 | 20 | 25 | 30 |
| Paille d'avoine | 0,8 | 4,0 | 7,5 | 11,7 |
| Paille d'avoine hachée | 0,8 | 4,0 | 7,5 | 11,7 |
| Paille d'orge | 0,9 | 4,6 | 9,3 | 15,3 |
| Paille d'orge hachée | 0,9 | 4,6 | 9,3 | 15,3 |
| Foin | 1,0 | 5,4 | 11,9 | 22,0 |
| Résidus de maïs | 1,6 | 7,6 | 14,9 | 23,8 |
| Tourbe blonde | 1,4 | 6,9 | 13,5 | 21,3 |
| Tourbe brune | 1,4 | 7,1 | 14,5 | 24,4 |
| Tourbe noire | 1,1 | 5,3 | 10,4 | 16,6 |
| Sciures de bois franc | 0,9 | 4,1 | 7,3 | 10,7 |
| Sciures de tremble | 1,2 | 5,2 | 9,4 | 13,6 |
| Ripe de pin | 0,6 | 2,9 | 5,1 | 7,5 |
| Écorces de tremble | 1,3 | 6,1 | 11,3 | 16,9 |
| Copeaux d'élagage | 1,4 | 6,8 | 13,0 | 20,3 |
| Papier journal haché | 0,7 | 3,1 | 5,5 | 8,0 |
| Boues de papetières | 1,8 | 8,4 | 15,4 | 22,7 |
| Feuilles d'érable | 1,7 | 8,2 | 16,6 | 27,5 |

## 3.6 ESSAIS D'ABSORPTION DE LA PAILLE À LA FERME

Le temps d'absorption et la surface de contact entre la litière et les liquides du dalot influencent directement le pouvoir absorbant des litières à cet endroit. Pour valider cette hypothèse, des essais d'absorption avec de la paille disposée dans le dalot ont été réalisés sur une ferme laitière de la région de Québec.

### 3.6.1 MÉTHODOLOGIE

Des essais d'absorption des liquides du dalot sur une ferme laitière ont été réalisés avec diverses quantités de paille d'avoine non hachée variant de 1 à 6 kg/u.a.-j. Lors de l'écurage, (1 ou 2 fois par jour), les liquides non absorbés par la litière ont été recueillis à la base de la montée d'écureur tel qu'illustré à la figure 3.2. Une grille métallique perforée placée au fond du dalot d'écurage, avant la montée d'écureur, permettait de recueillir la fraction liquide non absorbée par la paille. À chaque écurage, le volume de liquide qui s'est écoulé de la grille métallique a été mesuré. La description des essais est présentée au tableau 3.4.

Le troupeau de la ferme se compose de 38,5 u.a. La TEE mesurée de la paille d'avoine non hachée est de 13 % b.h. Le volume d'urine produit par unité animale est variable, mais il est estimé à 25 % du volume des déjections (BPR, 1992), ce qui correspondrait à environ 12,25 L/u.a.-j et à une production quotidienne pour le troupeau de 472 L/j.

## TABLEAU 3.4 : DESCRIPTION DES ESSAIS D'ABSORPTION DE LA PAILLE DANS LE DALOT

| Quantité de paille (kg/u.a.-j) | Nombre d'écurage par jour | Nombre de répétitions |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 3 |
| 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 |
| 4 | 1 | 2 |
| 4 | 2 | 2 |
| 6 | 1 | 2 |

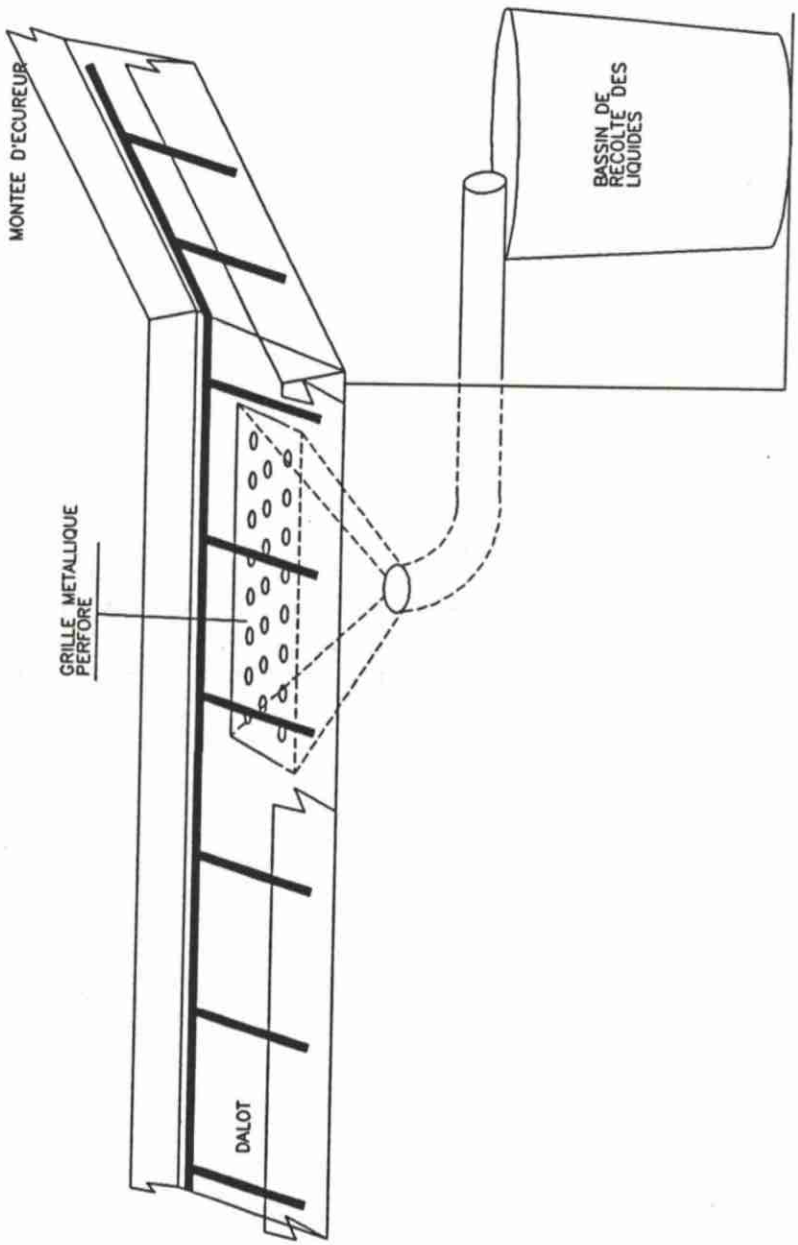



**Figure 3.2 : Schéma du système de récolte des liquides de dalot non absorbés**

### 3.6.2 RÉSULTATS

Les volumes du liquide récolté (non absorbés par la paille) après chaque écurage sont présentés au tableau 3.5. Ces volumes de liquide recueillis 12 ou 24 heures (1 ou 2 écurage(s)/jour) après l'application de diverses quantités de paille d'avoine, ont varié de 171 à 284 litres. En estimant la production quotidienne d'urine produite par l'équivalent de 38,5 u.a. à 472 L/j, on calcule la production d'urine absorbée. En pratique, cette fraction comprend à la fois la quantité d'urine absorbée par la paille et une quantité indéterminée d'urine non-absorbée mais évacuée par la montée d'écureur. De cette façon on estime la teneur en eau résiduelle du fumier entreposé. Pour l'ensemble des essais, la paille a absorbé entre 40 et 64 % des liquides théoriquement produits. Curieusement, les valeurs obtenues ne permettent pas d'établir de relation directe entre la quantité de litière utilisée, la fréquence d'écurage et le volume d'urine absorbée. La dose maximale de paille utilisée lors des essais (6 kg/u.a.-j à 2 écurages) occasionne autant de liquide non absorbé que la dose minimale de 1 kg/u.a.-j. Plus la quantité de paille utilisée au dalot est importante, plus la quantité d'urine absorbée par unité de paille est faible. Ces observations nous amènent à penser que la quantité de litière en contact avec les liquides dans le dalot demeure relativement constante et ce, peu importe la quantité de paille appliquée sous les animaux.

Si la quantité de liquides récoltée à la base de la montée d'écureur reste sensiblement la même pour des quantités de paille variant entre 1 et 6 kg/u.a.-j, la teneur en eau résiduelle du fumier évacuée diminue avec des quantités de paille croissantes. Dans une perspective de compostage du fumier après entreposage, l'utilisation de paille à des doses égales ou supérieures à 4 kg/u.a.-j est requise pour l'obtention d'un fumier dont l'humidité est inférieure à 80 %. Si la fraction liquide du fumier n'est pas absorbée par la paille lors de l'empilement du fumier, le risque de production de lixiviats est plus élevé. L'entreposage des liquides non-absorbés au dalot pour 38,5 u.a. nécessiterait la mise en place d'un purot couvert pour 200 jours d'entreposage d'une capacité minimum de 45 000 L et ce quelque soit la quantité de paille utilisée. L'absence d'un système qui permet d'éliminer l'urine au dalot entraîne une teneur en eau résiduelle du fumier entreposé plus élevée.

## TABLEAU 3.5 : VOLUME D'URINE NON ABSORBÉE APRÈS L'ÉCURAGE DU FUMIER

| Litière (kg/u.a.-j) | Nombre d'écurage | Volume d'urine non-absorbée (litres) | Proportion d'urine absorbée [1] et/ou évacuée (%) | Teneur en eau résiduelle du fumier entreposée |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 208 | 55,9 | 84,5 |
| 2 | 1 | 218 | 53,8 | 82,9 |
| 2 | 1 | 218 | 53,8 | 82,9 |
| 2 | 1 | 197 | 58,3 | 83,0 |
| 2 | 2 | 268 | 43,2 | 82,5 |
| 2 | 2 | 268 | 43,2 | 82,5 |
| 3 | 1 | 171 | 63,8 | 81,7 |
| 3 | 1 | 245 | 48,1 | 81,1 |
| 3 | 1 | 188 | 60,2 | 81,6 |
| 4 | 1 | 281 | 40,5 | 79,3 |
| 4 | 1 | 284 | 39,8 | 79,3 |
| 4 | 2 | 219 | 53,6 | 79,9 |
| 4 | 2 | 212 | 55,1 | 80,0 |
| 6 | 2 | 218 | 53,8 | 77,2 |
| 6 | 2 | 207 | 56,1 | 77,2 |

1) Production quotidienne d'urine théorique de 472 L/j pour 38,5 u.a.

Le volume de purin qui serait théoriquement absorbé par de la paille d'avoine, si les conditions d'absorption au dalot étaient identiques aux conditions de laboratoire, est présenté au tableau 3.6. Les calculs ont été faits pour 38,5 u.a. et pour une QEA eff. de 2,25 ou 2,70 kg eau absorbable/kg de matériel correspondant à 12 ou 24 heures (1 ou 2 écurages quotidiens). Ces calculs ne sont valides que pour la paille.

## TABLEAU 3.6 : VOLUME THÉORIQUE D'URINE ABSORBÉE PAR LA PAILLE D'AVOINE

| Quantité de litière (kg / u.a. - j) | Nombre d'écurage quotidien | Volume absorbé [1] (Litre / jour) |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 104 |
| 2 | 1 | 208 |
| 2 | 2 | 173 |
| 3 | 1 | 312 |
| 4 | 1 | 416 |
| 4 | 2 | 346 |
| 6 | 2 | 520 |

1) pour 38,5 unité animale

Ce tableau indique clairement que théoriquement, plus la quantité de paille est élevée, plus le volume de purin absorbé est élevé. On obtient même une valeur de volume absorbé par la paille plus grande que la production théorique quotidienne d'urine (472 Litres/jour) avec 6 kg/u.a.-j et deux écurages quotidiens (520 Litres/jour). Tel qu'indiqué précédemment, ces résultats n'ont pas été obtenus en pratique à la ferme. Les propriétés absorbantes de la paille ne peuvent être mises pleinement à contribution au dalot en raison des temps et de la qualité de contact urine/paille.

## 3.7 CONCLUSION

Le compostage du fumier de bovins laitiers s'inscrit comme un mode de gestion du fumier solide et pour plusieurs, le compostage constitue une avenue qui permet de gérer la totalité du fumier produit sous une forme solide sans avoir à se préoccuper de la production et de la gestion de liquides ou de lixiviats.

Pour réaliser adéquatement le compostage du fumier de bovins laitiers, l'obtention d'un fumier qui respecte les critères des principaux paramètres de compostage (teneur en eau, porosité, rapport C/N) est essentielle. La quantité nécessaire de litière requise peut être déterminée pour rencontrer chacun de ces critères et optimiser ainsi le compostage du fumier à la ferme laitière.

Sur la ferme, la nature, la quantité et le lieu d'utilisation des litières seront déterminants pour celui qui veut atteindre ces deux objectifs. La nature très humide du fumier de bovin laitier tel qu'on le rencontre sur les fermes constitue le principal problème pour celui qui envisage la gestion du fumier de bovins laitiers par compostage. Une teneur en eau élevée du fumier destiné au compostage réduit la porosité de ce dernier, ralentie les processus de compostage et augmente la quantité de lixiviats produits lors du compostage.

Pour réduire l'humidité du fumier, plusieurs approches sont envisageables selon le contexte particulier de chaque entreprise. Une première approche consiste à augmenter l'utilisation de litières comme absorbant pour réduire la teneur en eau du fumier sortant de l'étable. L'utilisation massive de paille se heurte à des problèmes pratiques (nombre d'écurages, mauvais contact paille/liquide, disponibilité), mécaniques (usure de l'écureur) et économiques. En pratique, les doses maximales de paille sont limitées à moins de 6 kg/u.a.-j par les systèmes d'évacuation utilisés sur les fermes laitières. Une deuxième approche consiste à dévier rapidement de la chaîne de gestion, les liquides générés à l'étable.

L'utilisation de quantités de litière comprises entre 4 et 12 kg/u.a.-j permet d'atteindre les valeurs recherchées pour les principaux paramètres de compostage. La porosité effective du fumier qui est fonction de la teneur en eau de ce dernier, représente un paramètre physique très important à considérer pour le compostage. Une quantité minimale de paille de 4 kg/u.a.-j est requise pour obtenir un fumier (TEE de 80 %) dont la porosité est adéquate en début de compostage. Pour augmenter le rapport C/N du fumier à une valeur optimale de 30, une quantité importante de paille d'environ 12

kg/u.a.-j serait requise. Un rapport C/N trop faible favorisera les pertes en azote par volatilisation lors du compostage mais n'entravera pas les processus de compostage.

La quantité de paille déterminée en laboratoire qui est requise pour l'absorption complète de l'urine produite au dalot est évaluée à 3,5 kg/u.a.-j.

Au dalot cependant, la qualité du contact paille/urine et le temps d'absorption permettent d'absorber qu'une fraction de l'urine produite. Lors des essais d'absorption à la ferme, l'utilisation de quantité de paille variant de 1 à 6 kg/u.a.-j n'a pas permis de réduire la quantité de liquide récolté avant l'évacuation du fumier par montée d'écureur.

La quantité d'urine recueillie à la base de la montée d'écureur représentait environ 50 % de la quantité théorique produite pour des quantités de paille variant entre 1 et 6 kg/u.a.-j. Puisque la quantité de paille non hachée requise pour le compostage est de 4 kg/u.a-j pour satisfaire la porosité, cette quantité pourrait être ajoutée totalement au dalot.

L'utilisation d'absorbants dont les particules sont relativement petites permettrait d'améliorer le contact litière/liquides et augmenterait l'efficacité de l'absorption. L'emploi complémentaire d'absorbants tel que la paille hachée, la sciure de bois, la tourbe et la ripe de pin disposés dans le fond du dalot apparaît être une technique plus efficace pour mettre à contribution le pouvoir absorbant des litières.

La mise en place de combinaisons paille/autres absorbants disposés dans le fond du dalot peut permettre de ramasser la totalité des liquides produits au dalot. La teneur en eau du fumier ainsi produit sera élevée à moins d'utiliser des doses massives de litière. Conséquemment, les risques de générer des lixiviats lors de l'entreposage en tas suite au ressuyage et à la compression du matériel sont très élevés. Un purot sera alors requis lors de l'entreposage.

Dans l'optique de maximiser l'absorption des liquides à l'étable, l'utilisation exclusive et importante de paille non hachée ne constitue pas une avenue intéressante. Par contre, en utilisant une quantité de paille de 4 kg/u.a.-j et en déviant les liquides du dalot vers un purot, le fumier destiné à l'entreposage couvert et subséquemment au compostage sera plus sec.

Dans une optique de compostage, il apparaît donc très intéressant de dévier rapidement la fraction liquide du fumier avant l'entreposage à l'aide d'une rigole située dans le dalot ou d'une grille avant la montée d'écureur. Bien que cette technique nécessite la mise en place d'un purot, elle a le double avantage de réduire la quantité de liquides à absorber et de produire, pour une quantité de paille donnée, un fumier dont la teneur en eau sera plus faible.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIOREX (1989). Le compostage du fumier à la ferme. Étude de faisabilité technico-économique et évaluation des impacts agronomiques et environnementaux, Québec : Ministère de l'Environnement, 275 p.

Consultants BPR Inc. (1993). Développement et démonstration de nouveaux concepts «Évacuation-entreposage-reprise» des fumiers de bovins laitiers : rapport final préliminaire. Québec : Ministère de l'Environnement, 65 p.

CPVQ et Service du génie MAPAQ. (1992). Structure d'entreposage des fumiers, lisiers de purins : manuel d'ingénierie, AGDEX-710, 135 p.

Ensminger, M.E. (1980). Dairy Cattle Science, 2 e édition, p. 348.

Fortier, M. et Joncas, R. (1990). Densité et capacité d'absorption de diverses litières utilisées dans les bâtiments d'élevage. MAPAQ, Agdex 538, 23 p.

Jeris, J.S., Regan, R.W., (1973). Controlling Environmental Parameters for Optimum Composting : Part I. Experimental Procedures and Temperature. Compost Science. 23 p.

Nyronen, T. et Reinikainen, O. (1989). Some Applications of Peat in Waste Treatment. Dans : Proceedings Symposium'89 : Peat and Peatlands, Diversification and Innovation. Vol. II. Québec, p. 214-217.

Peltola, I. (1985). Use of Peat as Litter for Milking Cow. Dans : Odour Prevention and Control of Organic Sludge and Livestock Farming. Edited by V.C. Nielsen, J.H. Voorburg, and P. L'Hermite, p. 181-187.

Reed, M.J. et McCartney, M.G. (1970). Physical Properties of Selected Litter Materials and Performance of Broiler Chickens. University of Georgia, College of Agriculture Experiment Stations, Research bulletin 75, 22 p.

Sobel, A.T., Ludington, D.C. et Kim Van Yow (1988). Altering Dairy Manure Characteristics for Solid Handling by the Addition of Bedding. International Agrophysics. 4 (1-2) : 31-48 p.

# CHAPITRE 4 : ESSAIS DE COMPOSTAGE DU FUMIER DE BOVINS LAITIERS SUR PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE : ÉTÉ 1992

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

## 4.1 INTRODUCTION

Le compostage en andain des fumiers de ferme est une pratique de plus en plus populaire. Aussi, la recherche de nouveaux modes de gestion des fumiers plus respectueux de l'environnement et moins coûteux font l'objet de plusieurs projets de développement. Le compostage comme maillon de la chaîne de gestion des fumiers s'inscrit dans la recherche de techniques plus efficaces.

Les différents scénarios, étudiés par BIOREX (1989) dans leur étude technico-économique du compostage des fumiers, tiennent compte de plusieurs variables :

1) compostage ou non des fumiers;
2) type d'entreposage (sur sol, sur plate-forme de béton avec ou sans muret pour retenir les liquides);
3) quantité de litière utilisée (2,4 à 6,0 kg de litière/u.a.-j);
4) nombre et type de retournements (à forfait ou non, type de retourneur);
5) utilisation ou non de phosphates et de sciures de bois au dalot.

Les particularités des entreprises laitières en matière de gestion des fumiers rendent le nombre de scénarios de compostage à toute fin pratique illimité. À la technique habituelle du compostage en andain, de nombreuses variantes peuvent être apportées. Ces points concernent notamment le nombre de retournements, la quantité de litière, le recouvrement et le type de matériau utilisé à cette fin ainsi que l'essorage plus ou moins important du fumier.

Plusieurs interrogations demeurent quant à l'impact environnemental du compostage en andain, aux coûts des différentes opérations qui s'y rattachent, ainsi qu'à la plus-value du compost comparativement au fumier non composté.

## 4.2 OBJECTIFS

L'objectif principal des essais de compostage du fumier de bovins laitiers réalisés à l'été 1992 sur le site expérimental du CRIQ, consiste à valider les scénarios de compostage qui pourraient être réalistement implantés sur les fermes laitières québécoises. Il vise l'obtention de données de base qui permettront de préciser la pertinence environnementale et agronomique du compostage à la ferme.

Les objectifs spécifiques sont :

- suivre, en cours de compostage, l'évolution des principaux paramètres du compostage;
- quantifier les pertes en eau, en éléments fertilisants majeurs, en masse sèche et en matière organique encourues en cours de compostage afin de dresser le bilan massique complet;
- déterminer la quantité et les caractéristiques du lixiviat produit;
- déterminer la valeur agronomique du compost de fumier;
- préciser les avantages et les contraintes du compostage.

## 4.3 MÉTHODOLOGIE

### 4.3.1 CHOIX DES SCÉNARIOS

Le choix des scénarios retenus pour les essais de compostage repose sur des considérations pratiques rencontrées sur les fermes laitières québécoises. Le nombre de scénarios à l'étude est limité par la configuration du site expérimental de compostage. Les scénarios suivants ont été retenus :

- fumiers très pailleux (6,4 kg/u.a.-j) avec retournements (trois) et sans retournement;
- fumiers moyennement pailleux (4 kg/u.a.-j) sans recouvrement (à l'extérieur) et avec recouvrement (sous abri);
- fumiers avec des quantités variables de litière : (2, 4, et 6,4 kg litière/u.a.-j);
- fumier essoré avec recouvrement.

Les auteurs sont conscients que le dispositif expérimental utilisé ne permet pas de comparer statistiquement entre eux l'ensemble des scénarios à l'étude (origine variable des fumiers). De plus, l'absence de répétitions pour le compostage des substrats jumelée à une saison unique d'essais (conditions climatiques précises) nous oblige à considérer les résultats comme des données préliminaires de base et à faire preuve de discernement lors de l'interprétation des résultats.

### 4.3.2 DESCRIPTION DU SITE DE COMPOSTAGE EXPÉRIMENTAL ET DES ÉQUIPEMENTS

Les essais de compostage ont été réalisés à l'été 1992 sur le site expérimental de compostage localisé sur les terrains du CRIQ. La figure 4.1 présente une vue d'ensemble du site expérimental. Les emplacements C1 à C6 sont de construction identique et permettent le compostage en pile des substrats. Les sites C1 et C2 sont couverts d'un abri de toile imperméable pour éviter l'apport d'eau par les précipitations.

La superficie bétonnée de chacun des emplacements (plate-forme) est de 35,17 m². La forme convexe des plates-formes permet de récolter deux types de liquides qui sont produits par les composts en cours d'expérimentation. Les liquides de percolation sont recueillis à la base de la pile de compost à l'aide d'une ouverture de 1,7 m² située au centre du plancher de béton. Les autres liquides (eau de ruissellement) sont récoltés par deux orifices situés aux coins de chaque emplacement au niveau le plus bas du plancher. Les eaux de percolation sont récoltées dans des réservoirs de plastique d'une capacité de 227 litres alors que les eaux de ruissellement sont acheminées dans des réservoirs de 1 364 litres. On retrouve à la figure 4.2, le schéma d'une plate-forme de compostage. Les figures 4.3 et 4.4 présentent la direction de l'écoulement des liquides à la surface de ces plates-formes.

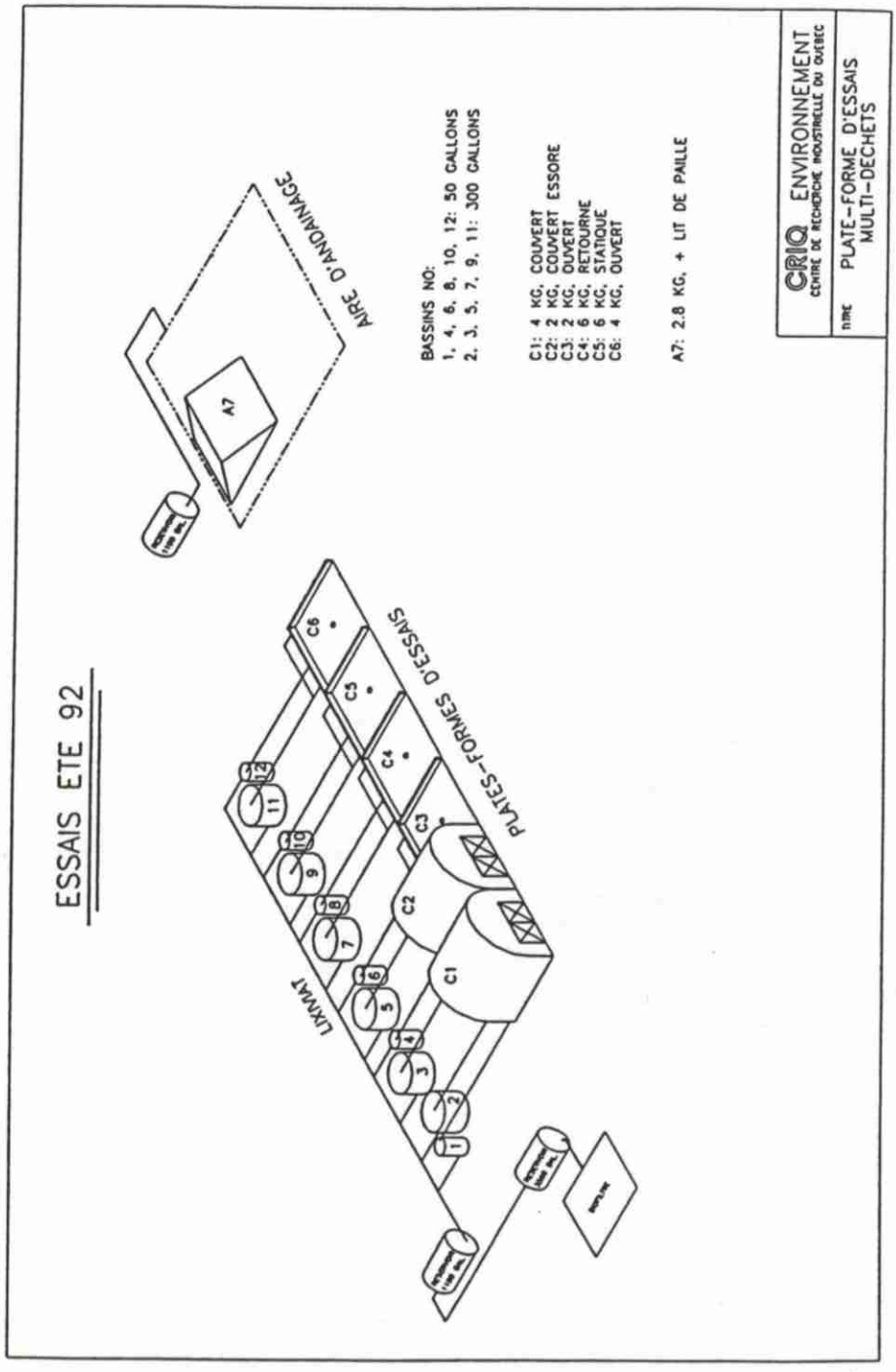



**Figure 4.1 : Vue d'ensemble du site d'essais**

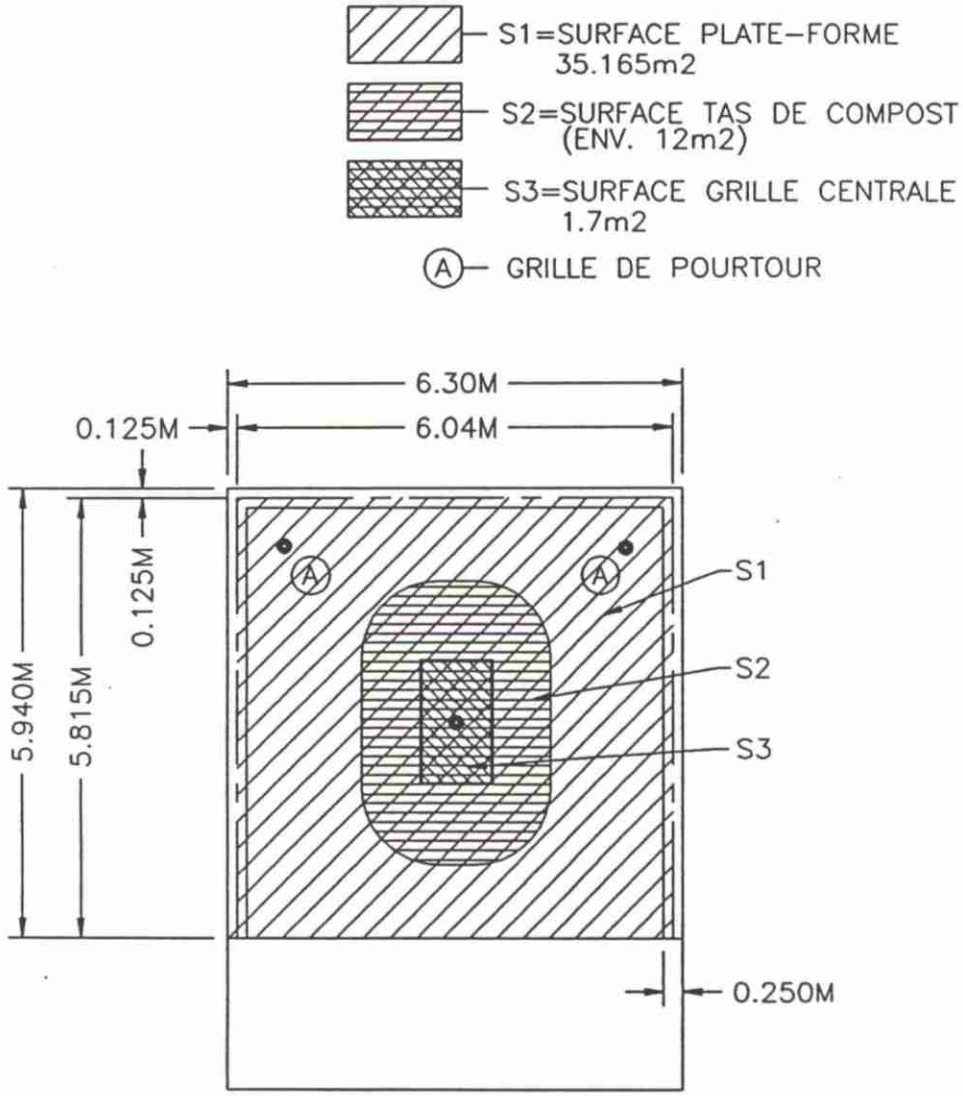
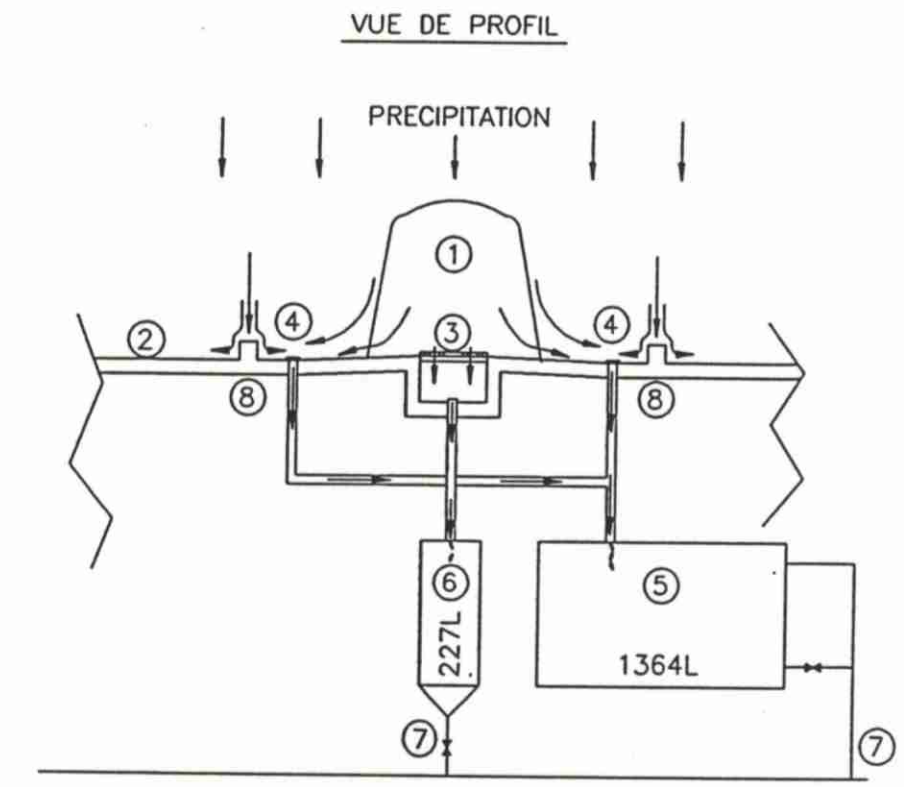


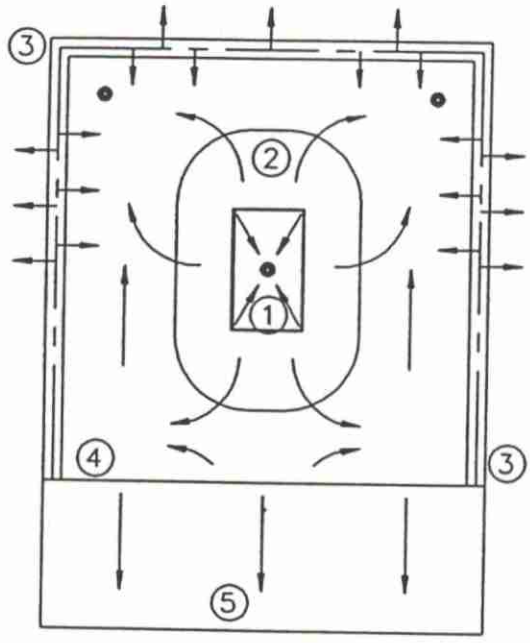

**Figure 4.2 : Schéma d'une plate-forme de compostage**




① TAS DE COMPOST
② PLANCHER DE BETON
③ GRILLE CENTRALE (lixiviat de percolation)
④ GRILLE DE POURTOUR (lixiviat de ruissellement)
⑤ RESERVOIR POUR LIXIVIAT DE POURTOUR
⑥ RESERVOIR DE LIXIVIAT DU CENTRE
⑦ TUYAUTERIE D'AMENEE DES LIXIVIATS VERS LE BIOFILTRE
⑧ MURET DE BETON

**Figure 4.3 : Écoulement des lixiviats sur les piles de composts**

VUE EN PLAN




① GRILLE CENTRALE

② TAS DE COMPOST

③ MURET DE BETON

④ PLATE–FORME DE BETON

⑤ RAMPE D'ACCES

**Figure 4.4 : Écoulement des lixiviats sur une plate-forme de compostage**

Une station météorologique installée sur le site de compostage enregistre la direction et la force des vents, les températures, l'humidité relative de l'air et les précipitations en temps réel et de façon continue.

Les températures des composts sont mesurées à l'aide d'un thermomètre digital (Hanna HI 9063, type K). La teneur en oxygène dans les espaces lacunaires des composts est mesurée à l'aide d'un oxymètre (Teledyne 320P/D). Les températures et les teneurs en oxygène sont prises au centre de la pile à une profondeur de 70 cm, à raison de deux fois par semaine, soit le lundi et le vendredi.

Les fumiers sont acheminés sur le site au moyen de camions à benne basculante et disposés en pile au cours de la même journée au moyen d'un épandeur à fumier d'une capacité de 7,3 $m^3$. Le fumier non retourné a été mis directement en pile à l'aide d'un camion à benne basculante.

### 4.3.3 FUMIERS DE BOVINS LAITIERS À L'ÉTUDE

Tous les fumiers acheminés au site de compostage proviennent de fermes laitières situées dans la grande région de Québec. Au total, quatre fumiers d'origine différente ont été mis à l'essai sur les plates-formes C1 à C6. Le tableau 4.1 présente pour chacun des essais le type de traitement, la quantité de litière et le mode d'évacuation utilisés à la ferme, le type et la durée d'entreposage des fumiers avant leur transport au CRIQ.

Les différences majeures entre les traitements se situent au niveau de la quantité de litière, du nombre de retournements et du recouvrement des composts.

La quantité de litière utilisée aux diverses fermes varie pour l'ensemble des fumiers de 2,0 à 6,4 kg/u.a.-j. Le mode d'évacuation, le type et la durée d'entreposage des fumiers varient selon les exploitations agricoles.

Les fumiers C1 et C6 proviennent de la même ferme et la différence entre les deux traitements réside dans le fait que durant le compostage le fumier C1 est couvert alors que le fumier C6 ne l'est pas. Les fumiers C4 et C5 sont également de nature identique, le premier étant retourné alors que le second est composté sans retournement. Le fumier C2 a été essoré mécaniquement à l'aide d'une essoreuse de marque Reimes avant d'être acheminé au site de compostage. L'essorage a diminué la teneur en eau b.h. initiale du fumier de 80 % à 76 %. Les particularités techniques de l'essoreuse Reimes sont décrites au chapitre 6 et à l'annexe B.

## TABLEAU 4.1 : DESCRIPTION DES FUMIERS

| Traitement | Litière | | Mode d'évacuation | Entreposage | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Type | Quantité (kg/u.a.-j) | | Type de structure | Durée (j) |
| C1<br>- couvert<br>- retourné | paille hachée<br>ripe de pin<br>**total** | 2,1<br>1,9<br>**4,0** | Montée d'écureur | - entrepôt couvert<br>- plancher et mur de béton | 2-15 |
| C2<br>- couvert<br>- retourné<br>- essoré de 80 % à 76 % de TEE | paille hachée | **2,8** | Piston | - entrepôt couvert<br>- plancher de béton | 60 |
| C3<br>- non couvert<br>- retourné | paille non hachée | **2,0** | Montée d'écureur | - plancher de béton avec muret en sol | <150 |
| C4<br>- non couvert<br>- retourné | paille non hachée | **6,4** | Montée d'écureur | - plancher de béton avec muret en sol | 2-15 |
| C5<br>- non couvert<br>- statique | paille non hachée | **6,4** | Montée d'écureur | - plancher de béton avec muret en sol | 2-15 |
| C6<br>- non couvert<br>- retourné | paille hachée<br>ripe de pin<br>**total** | 2,1<br>1,9<br>**4,0** | Montée d'écureur | - entrepôt couvert<br>- plancher de béton | 2-15 |

Note C1 et C6 : fumier provenant de la même ferme
C4 et C5 : fumier provenant de la même ferme

### 4.3.4 MÉTHODE DE COMPOSTAGE

À leur arrivée au site de compostage, les fumiers sont déposés sur les plates-formes de compostage, en pile d'environ 1,5 m de hauteur, 4 m de largeur et 5 m de longueur. Ces dimensions correspondent à une section d'andain habituellement retrouvé sur les fermes laitières. Les retournements ont été réalisés à l'aide d'un tracteur et d'un épandeur à fumier à trois reprises au cours des essais, ce qui correspond à une fréquence approximative mensuelle.

Les essais de compostage ont débuté le 23 mai 1992 et se sont terminés le 14 octobre de la même année. Le temps de compostage est d'environ 140 jours pour les traitements C1, C3, C4, C5 et C6. Les délais encourus par les opérations d'essorage du fumier C2 ont réduit le temps de compostage de ce dernier à 97 jours. Le tableau 4.2 présente les opérations pratiquées sur les divers traitements au cours des essais.

Les camions sont pesés à leur arrivée au site de compostage afin de déterminer la masse initiale de fumier frais pour chaque traitement. Les volumes de fumier et de compost sont mesurés dans l'épandeur à fumier avant leur mise en pile lors des retournements. Le volume du fumier a été mesuré dans le camion qui a servi pour son transport. À la fin de la période de compostage, la masse des composts est mesurée à l'aide d'un ensemble de balances mobiles disposées sous l'épandeur à fumier.

## TABLEAU 4.2 : DESCRIPTION DES OPÉRATIONS EN COURS DE COMPOSTAGE

| Opération | C1 | C2[1] | C3 | C4 | C5 | C6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Transport des fumiers au CRIQ | 28/05 | 08/07 | 23/05 | 23/05 | 23/05 | 28/05 |
| Mise en pile: **Début des essais** | 28/05 | 08/07 | 27/05 | 23/05 | 23/05 | 28/05 |
| 1er retournement (R1) | 16/06 | 22/07 | 16/06 | 16/06 | | 16/06 |
| 2 ième retournement (R2) | 23/07 | 01/09 | 22/07 | 22/07 | | 23/07 |
| 3 ième retournement (R3) | 01/09 | | 01/09 | 01/09 | | 01/09 |
| **Fin des essais** | 13/10 | 13/10 | 14/10 | 14/10 | 14/10 | 13/10 |
| Temps de compostage (j) | 138 | 97 | 140 | 144 | 144 | 138 |

1) Essorage mécanique du fumier C2 le 7 juillet avant son transport au CRIQ.

### 4.3.5 MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE

#### 4.3.5.1 Fumiers et composts

Tous les fumiers et composts sont analysés, après homogénéisation dans l'épandeur à fumier, sur des échantillons composés d'au moins 5 sous-échantillons. Le volume de l'échantillon de fumier et de compost prélevé à chaque échantillonnage est de 20 litres. Les échantillons sont conservés à 4 °C jusqu'à l'analyse. Certaines analyses sont cependant réalisées rapidement sur le matériel frais.

#### 4.3.5.2 Lixiviats

Les volumes de lixiviats (ruissellement et percolation) produits par les composts sont mesurés à tous les jours en début de matinée et ce, du lundi au vendredi. Au cours de la période de compostage, 5 séries d'analyses de lixiviats provenant des composts non couverts (C3 à C6) ont été effectuées suite aux précipitations. À chaque échantillonnage, la quantité de précipitation, son intensité et sa durée ont été notées. Les lixiviats sont prélevés à raison d'un litre par échantillon puis analysés.

## 4.3.6 MÉTHODES D'ANALYSE

### 4.3.6.1 Fumiers et composts

Les échantillons de fumier et de compost sont homogénéisés manuellement avant les prélèvements pour les analyses spécifiques.

| | |
|---|---|
| Teneur en eau | Séchage à l'étuve à 105 °C jusqu'à poids constant d'une masse d'échantillon frais de 100 à 200 g. |
| Matière organique | Calcination à 375 °C pendant une nuit, sur échantillon séché et broyé (<0,5 mm) (CPVQ, Agdex 533, MA-2). |
| pH | Mesure sur échantillon saturé à l'eau, pH-mètre Fisher Accumet 750. (CPVQ, Agdex 533, SS-1). |
| Conductivité électrique | Saturation de l'échantillon à l'eau, décantation et lecture sur le surnageant avec conductivimètre YSI 34. (CPVQ, Agdex 533, SS-1). |
| Azote total (excluant $NO_2$ et $NO_3^-$) | Digestion avec $H_2SO_4$ + Se sur matériel humide broyé, Kjeltec 1030 (ASN 45/82 Tecator). |
| $N\text{-}NH_4$ | Extraction au KCl 2M, décantation et distillation avec Kjeltec 1030 (CPVQ, Agdex 533, AZ-3). |
| $N\text{-}NO_3$ | Extraction à l'eau chaude, centrifugation et filtration, chromatographie ionique HPLC. |
| Phosphore | Calcination 550 °C suivie d'une digestion au HCl 25 % v/v, détermination par spectrophotomètre d'émission au plasma (CPVQ, Agdex 533, FO-1). |
| Potassium | Calcination 550 °C suivie d'une digestion au HCl 25 % v/v, détermination par spectrophotomètre d'émission au plasma (CPVQ, Agdex 533, FO-1). |

| | |
|---|---|
| Porosité de drainage | Saturation du matériel avec de l'eau pendant 24 heures. Drainage de l'échantillon pendant 1 heure et calcul du pourcentage volumique d'air. La porosité effective est calculée à partir de la porosité de drainage à l'humidité du matériel analysé. |
| Respirométrie | 400 g d'échantillon frais broyé et dilué dans 4 litres d'eau. Détermination de la quantité d'oxygène consommé pour une période de 20 heures. |

#### 4.3.6.2 Méthodes d'analyses des lixiviats

| | |
|---|---|
| Teneur en eau | Séchage à l'étuve à 105 °C d'un échantillon frais de 100 ml. |
| DCO | Méthode titrimétrique après chauffage à reflux fermé. Solution oxydante $K_2Cr_2O_7$ 0,0417M, solution titrante $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 .6H_2O$ 0,25M (AWWA #5220C). |
| $DBO_5$ | Standard Method for the examination of water and wastewater, 1989. |
| pH | Mesure directe sur lixiviats, pH-mètre Fisher Accumet 750. |
| Conductivité électrique | Mesure directe sur lixiviats, conductivimètre YSI 34. |
| MES | Filtration sur papier filtre Whatman 934-AH et séchage à 105 °C (AWWA # 2540 D). |
| Azote total | Digestion avec $H_2SO_4$ + Se sur échantillon liquide, Kjeltec 1030 (ASN 45/82 Tecator). |
| $N\text{-}NH_4$ | Distillation de l'échantillon frais avec Kjeltec 1030 (CPVQ, Agdex 533, AZ-3). |
| $N\text{-}NO_3$ | Centrifugation et filtration du lixiviat, chromatographie ionique HPLC. |

| | |
|---|---|
| Phosphore | Évaporation à sec, calcination à 550 °C suivie d'une digestion au HCl 25 % v/v, détermination par spectrophotomètre d'émission au plasma. |
| Potassium | Évaporation à sec, calcination à 550 °C suivie d'une digestion au HCl 25 % v/v, détermination par spectrophotomètre d'émission au plasma. |
| Coliformes fécaux | Mesure du MPN en tube, Bacteriological analytical manuel, 6th edition, 1984. |
| Coliformes totaux | Mesure du MPN en tube, Bacteriological analytical manuel, 6th edition, 1984. |

## 4.4 RÉSULTATS

La première section des résultats concerne les caractéristiques des fumiers utilisés lors des essais. La seconde section présente l'évolution des températures et des teneurs en oxygène en cours de compostage ainsi que l'évolution des teneurs en eau et de la matière organique, des teneurs en éléments majeurs et d'autres paramètres liés au compostage (pH, conductivité électrique). La troisième section expose les pertes en cours de compostage. À la quatrième section, on retrouve les caractéristiques des lixiviats générés par les composts en cours d'essais. Le bilan de l'eau est présenté à la cinquième section. La sixième section présente la valeur agronomique des composts produits. Finalement, on retrouve à la septième section, une évaluation des différents scénarios de compostage à l'étude.

### 4.4.1 CARACTÉRISTIQUES INITIALES DES FUMIERS

On retrouve au tableau 4.3, les caractéristiques initiales des fumiers mis à l'essai. Ces caractéristiques sont généralement appelées «paramètres de compostage» car elles influencent le déroulement des processus de compostage. Indépendamment de la quantité de litière utilisée à la ferme, on remarque que la teneur en eau b.h. des fumiers est très élevée ($\geq$ 73,9 %) et que le rapport C/N est inférieur à 20. Considérant les valeurs optimales recherchées pour le compostage des fumiers (cf. chapitre 1), ces deux critères ne sont pas respectés.

La teneur en eau du fumier C3 est plus faible (73,9 %) que celle des autres fumiers. Cette valeur ne correspond pas à la teneur en eau moyenne du fumier entreposé en tas sous la montée d'écureur. En effet, la base du tas de fumier entreposé à la ferme était saturée de liquide, alors que le fumier utilisé pour l'essai a été prélevé dans la partie supérieure du tas. On constate que sa teneur en eau est plus faible que le fumier essoré mécaniquement (C2).

Le C/N des fumiers C1 et C6 contenant 4 kg de litière/u.a.-j (C/N $\approx$ 20) est plus élevé que celui des autres fumiers (C/N $\approx$ 13) et ce, malgré le fait que les fumiers C4 et C5 (6,4 kg) contiennent plus de litière. On doit toutefois noter que la moitié de la litière des fumiers C1 et C6 est composée de ripe de pin contrairement aux autres fumiers qui ne contiennent que de la paille. Ces écarts illustrent bien l'influence du mode

d'entreposage, des caractéristiques du troupeau et de la litière sur les caractéristiques du fumier produit.

La porosité des fumiers est exprimée de deux façons à savoir : la porosité de drainage correspondant à un fumier saturé en eau après 1 heure d'égouttement et la porosité effective qui représente le pourcentage volumique d'air présent dans le matériel à la teneur en eau mesurée lors de l'échantillonnage.

Les porosités effectives des fumiers varient de 30,7 à 65,4 % et apparaissent suffisamment élevées pour permettre le déroulement adéquat des processus de compostage.

Les porosités de drainages et effectives les plus élevées correspondent à une quantité élevée de paille non hachée (C4 et C5: 6,4 kg/u.a.-j) ou à un fumier moins pailleux (C3: 2 kg/u.a.-j) dont la teneur en eau b.h. est plus faible (73,9 %). Malgré une dose de 4 kg de litière/u.a.-j, les fumiers C1 et C6 présentent une porosité effective plus faible d'environ 42 % en raison d'une teneur en eau élevée. La plus faible porosité effective est obtenue avec le fumier avec paille hachée essorée mécaniquement C2 (30,7 %). Avant essorage, la porosité de ce fumier était de 20,1 % à une TEE b.h. de 80,2 %.

Les pH des fumiers varient de 7,3 à 8,2 et se situent dans la zone de valeurs acceptables pour le compostage. Le pH du fumier C3, entreposé à la ferme pendant quelques mois, est le plus élevé. L'ensemble des fumiers ont un rapport N/P (azote - total/phosphore total) qui correspond à la valeur optimale recherchée comprise entre 2 et 5 (Mustin, 1987).

## TABLEAU 4.3 : CARACTÉRISTIQUES DES FUMIERS EN DÉBUT DE COMPOSTAGE

| Fumier | TEE b.h. (%) | Porosité (%) | | C/N | N/P | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | de drainage [1] | effective [2] | | | |
| C1 | 82,6 | 30,9 | 42,7 | 19,7 | 3,2 | 7,7 |
| C2 | 76,0 | 14,8 | 30,7 | 12,3 | 2,6 | 7,3 |
| C3 | 73,9 | 45,9 | 61,5 | 15,6 | 4,3 | 8,2 |
| C4 | 79,1 | 48,4 | 63,2 | 13,7 | 4,1 | 7,3 |
| C5 | 77,3 | 52,2 | 65,4 | 12,7 | 4,5 | 7,4 |
| C6 | 81,2 | 34,9 | 41,5 | 19,9 | 3,9 | 7,8 |
| Critères recherchés | 40 à 65 | --- | 30 à 36 | 30 à 50 | 2 à 5 | 5,5 à 8,0 |

(1) Après 1 heure d'égouttement suivant la saturation
(2) À la teneur en eau du fumier échantillonné

### 4.4.2 ÉVOLUTION DES PARAMÈTRES EN COURS DE COMPOSTAGE

#### 4.4.2.1 Températures

L'évolution des températures en cours de compostage pour l'ensemble des fumiers est présentée à la figure 4.5. Les températures présentées ont été prises au centre du tas à une profondeur de 70 cm de la surface. L'évolution de la température dans le compost résulte de l'équilibre entre la production d'énergie provenant de l'activité biologique et la perte d'énergie du compost vers le milieu environnant.

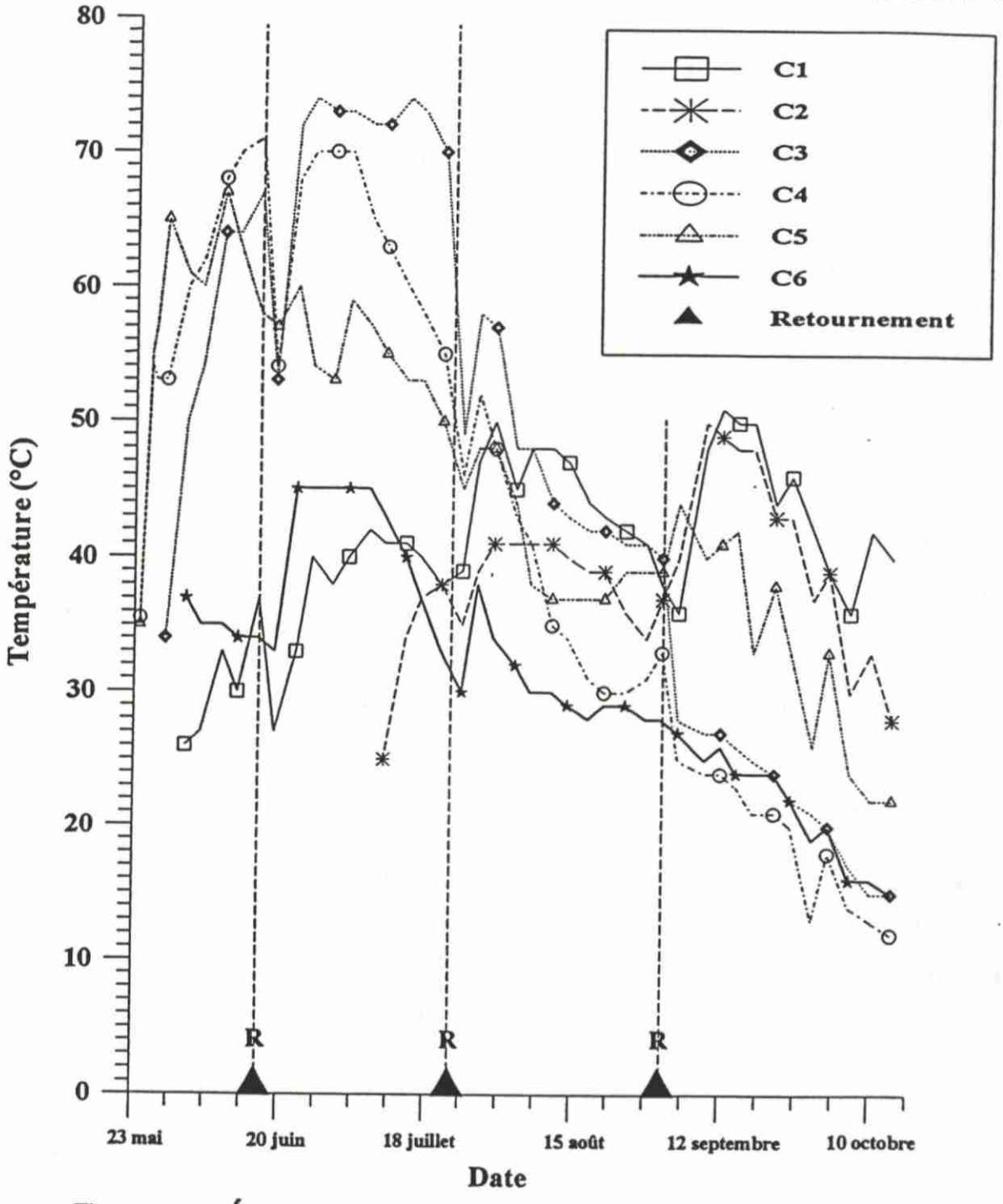



Figure 4.5 : Évolution des températures en cours de compostage

Tous les composts à l'essai ont atteint des températures égales ou supérieures à 45 °C pendant plusieurs jours répondant ainsi à un des critères de la définition du «compostage» suggérée par Zucconi (1987). Les températures les plus élevées ont été obtenues avec le compost C3 (2 kg de paille/u.a.-j) suite au premier retournement, soit environ 3 semaines après le début des essais. Elles correspondent au fumier de départ le plus sec alors que les températures les plus faibles (45 °C) ont été obtenues avec les composts (C1 et C6) dont la teneur en eau est la plus élevée (environ 82 %).

L'évolution normalement recherchée pour les températures (élévation rapide de la température au début et baisse graduelle par la suite) a été obtenue avec les trois composts dont la porosité effective variait entre 60 et 65 %. Ces trois composts avaient une TEE b.h. inférieure à 80 %. L'utilisation de 4 kg de paille dans le fumier n'a pas permis d'atteindre des températures supérieures à 52°C en raison de la teneur en eau élevée du fumier au départ (TEE >= 81 %). On ne peut établir de lien entre l'allure de ces courbes de température et la quantité de paille utilisée à l'étable. Ainsi l'utilisation de 2 kg de paille / u.a.-j (C3) a permi d'obtenir la plus forte élévation de température en raison d'une faible teneur en eau du matériel de départ (TEE = 74 %).

L'essorage du fumier C2 ne s'est pas traduit par une élévation importante des températures et ce en dépit d'une TEE faible (76 %). Cette opération n'a pas permis d'atteindre le niveau de porosité des autres fumiers.

En regard des processus de compostage, il apparaît souhaitable d'avoir une porosité effective du fumier supérieure à 60 %. Ces valeurs de porosité sont obtenues lorsque la teneur en eau b.h. des fumiers (avec paille non hachée) est inférieure à 80 %.

Dans le cadre de ces essais, nous ne pouvons établir de relations entre les faibles températures des composts observées à la fin des essais (octobre) et la maturité des composts. L'influence des températures de l'air extérieur sur les composts est confondue alors avec la baisse des températures attribuable à l'atteinte de la maturité.

#### 4.4.2.2 Teneurs en oxygène

Les teneurs en oxygène moyennes dans les espaces lacunaires des composts pour chaque période de 30 jours d'essais sont présentées au tableau 4.4. Les valeurs entre parenthèses représentent les températures moyennes correspondantes. Lorsque la teneur en eau du compost est très élevée (TEE $\geq$ à la saturation du matériel), il s'est avéré impossible d'obtenir des valeurs de teneur d'oxygène avec l'instrument utilisé. Dans une telle situation, le liquide du compost est pompé dans la sonde et empêche ainsi l'oxygène de se rendre au capteur. Cette situation traduit sans aucun doute une teneur en eau trop élevée pour assurer une oxygénation optimale du compost (> 5 %, cf chap. 1).

Les teneurs en oxygène moyennes des 6 traitements sont faibles pour les trois premiers mois de compostage. Les opérations de retournements mécaniques d'andain ne suffisent pas à maintenir des teneurs optimales en oxygène dans les composts. Il appert que tous les composts sont insuffisamment oxygénés en début de compostage et que dans une optique d'optimisation du procédé, l'introduction d'air par ventilation forcée serait nécessaire à tout le moins au cours du premier mois de compostage. Cependant, la pertinence et la mise en oeuvre d'une telle pratique à la ferme reste à démontrer.

## TABLEAU 4.4 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN OXYGÈNE DANS LES COMPOSTS EN COURS DE COMPOSTAGE

| Traitement | | Teneur en oxygène (% volume/volume) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Périodes d'échantillonnage | | | | |
| | | Jours 0-30 | jours 30-60 | jours 60-90 | jours 90-120 | jours 120-147 |
| C1 | min. | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,5 |
| | max. | 0,0 | 9,5 | 9,2 | 12,1 | 8,3 |
| | moy. | **0,0 (30,0)** [1] | **1,9 (39,2)** | **3,8 (45,7)** | **5,4 (44,4)** | **5,6 (40,8)** |
| C2 | min. | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 3,8 | |
| | max. | 0,0 | 15,3 | 9,9 | 11,1 | |
| | moy. | **0,0 (33,5)** | **3,2 (39,6)** | **5,5 (42,8)** | **6,2 (35,0)** | |
| C3 | min. | 0,0 | 1,6 | 1,0 | 2,5 | 11,1 |
| | max. | 4,6 | 7,6 | 8,0 | 16,6 | 17,2 |
| | moy. | **1,4 (55,1)** | **4,3 (72,6)** | **3,5 (47,9)** | **7,7 (31,0)** | **14,1 (18,3)** |
| C4 | min. | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 4,6 | 8,8 |
| | max. | 4,6 | 0,1 | 7,3 | 18,8 | 20,0 |
| | moy. | **0,6 (58,1)** | **0,0 (64,3)** | **2,4 (40,0)** | **11,7 (25,8)** | **13,7 (15,0)** |
| C5 | min. | 0,0 | 1,7 | 2,4 | 0,6 | 6,0 |
| | max. | 8,8 | 10,7 | 11,1 | 14,7 | 18,4 |
| | moy. | **3,3 (57,8)** | **6,6 (54,9)** | **6,0 (41,2)** | **9,0 (39,4)** | **11,2 (26,7)** |
| C6 | min. | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 4,8 |
| | max. | 0,0 | 13,2 | 13,4 | 18,2 | 19,9 |
| | moy. | **0,0 (34,7)** | **4,4 (42,0)** | **6,1 (31,1)** | **7,9 (26,1)** | **13,6 (18,0)** |

1) Les valeurs entre parenthèses désignent la température moyenne(°C).

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

### 4.4.2.3 pH

Le tableau 4.5 présente l'évolution des valeurs de pH des composts au cours de la période de compostage. Une augmentation marquée des pH pour l'ensemble des composts est observée lors du compostage. La valeur moyenne des pH de départ pour l'ensemble des fumiers est de 7,6 alors qu'elle est de 8,5 après 140 jours de compostage. D'après Mustin (1987), des valeurs finales de pH supérieures à 8 pour un fumier composté nous laisse croire que le compost n'est pas encore à un stade de maturation avancé.

De plus, des risques élevés de dégagement d'azote sous forme ammoniacal des fumiers à des pH supérieures à 8,2 ont été remarqués (Besson et al, 1982). En principe plus le pH est élevé, plus les pertes d'azote sous forme ammoniacale devraient être élevées.

**TABLEAU 4.5 : ÉVOLUTION DES pH EN COURS DE COMPOSTAGE**

| Traitement | pH | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | DÉBUT | Retournements | | | FIN |
| | | R1 | R2 | R3 | |
| C1 | 7,7 | 7,7 | 8,4 | 8,5 | 8,9 |
| C2 | 7,3 | 7,4 | 8,4 | | 8,3 |
| C3 | 8,2 | 7,6 | 8,1 | 8,4 | 8,3 |
| C4 | 7,3 | 7,5 | 8,4 | 8,5 | 8,4 |
| C5 | 7,4 | | | | 8,4 |
| C6 | 7,8 | 7,6 | 8,5 | 8,4 | 8,4 |

#### 4.4.2.4 Conductivité électrique

Le tableau 4.6 présente l'évolution des conductivités électriques (C.E.) des composts en cours de compostage. La C.E. indique la présence d'ions en solution qui participent à la salinité du milieu (Na, Ca, Mg, K, Cl, $SO_4$, etc.). Les composts couverts ont une C.E. plus élevée que les composts soumis aux précipitations et au lessivage. La C.E. finale des composts non couverts C6 est d'environ 57 % plus faible que celle du compost couvert C1. L'ampleur des pertes par lessivage dépendra notamment des quantités et de l'intensité des précipitations et influencera à la baisse la valeur fertilisante des composts.

**TABLEAU 4.6 : ÉVOLUTION DES CONDUCTIVITÉS ÉLECTRIQUES EN COURS DE COMPOSTAGE**

| Traitement | Conductivité électrique (mS/cm) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | DÉBUT | Retournements | | | FIN |
| | | R1 | R2 | R3 | |
| C1 | 13,5 | 9,4 | 11,4 | 10,9 | 11,9 |
| C2 | 8,7 | 11,5 | 8,6 | | 10,5 |
| C3 | 6,5 | 8,1 | 7,9 | 5,4 | 5,2 |
| C4 | 8,6 | 9,5 | 6,5 | 3,9 | 4,4 |
| C5 | 8,7 | | | | 4,4 |
| C6 | 12,3 | 9,9 | 7,9 | 5,1 | 5,0 |

#### 4.4.2.5 Teneur en eau

Les teneurs en eau, exprimées sur une base humide (TEE b.h.), des composts au cours du compostage sont présentées au tableau 4.7.

## TABLEAU 4.7 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN EAU EN COURS DE COMPOSTAGE

| Traitement | Teneurs en eau b.h. (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | DÉBUT | Retournements | | | FIN |
| | | R1 | R2 | R3 | |
| C1 | 82,6 | 81,3 | 78,1 | 76,9 | 74,6 |
| C2 | 76,0 | 75,7 | 73,4 | | 69,2 |
| C3 | 73,9 | 75,3 | 71,9 | 79,1 | 78,9 |
| C4 | 79,1 | 76,9 | 78,0 | 80,3 | 79,3 |
| C5 | 77,3 | | | | 79,5 |
| C6 | 81,2 | 80,1 | 81,4 | 82,0 | 82,4 |

Les teneurs en eau des composts couverts (C1 et C2) ont diminué progressivement au cours du compostage. Celles des composts non couverts sont restées semblables ou ont augmenté en cours d'essais. Elles sont aussi élevées que les valeurs moyennes des fumiers entreposés à la ferme (Antoun, 1980). Les composts couverts ont les plus faibles valeurs finales de TEE. En aucun temps et pour l'ensemble des traitements, la teneur en eau des composts a été inférieure à 70 % b.h.. Par contre ceci n'a pas empêché les processus de compostage de se produire.

### 4.4.2.6 Matière organique

Le tableau 4.8 présente l'évolution des teneurs en matière organique des composts pendant le compostage. Les teneurs en matière organique des fumiers compostés diminuent au cours du compostage suite aux processus de biooxydation des matières organiques. Pour un fumier de départ identique (4 kg de paille/u.a.-j), la teneur finale en matière organique du compost couvert C1 est plus faible (71,3 %) que celle du compost non couvert C6 (78,7 %). Le compostage sous abri a permis de réduire plus rapidement la masse de matière organique que le compostage sans recouvrement.

Les teneurs finales en matière organique sont égales pour le compost retourné C4 et le compost statique C5.

## TABLEAU 4.8 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN MATIÈRE ORGANIQUE EN COURS DE COMPOSTAGE

| Traitement | Teneurs en matière organique b.s. (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | DÉBUT | Retournements | | | FIN |
| | | R1 | R2 | R3 | |
| C1 | 82,3 | 81,9 | 73,3 | 74,2 | 71,3 |
| C2 | 67,4 | 59,4 | 53,1 | | 51,8 |
| C3 | 82,1 | 81,6 | 67,1[1] | 72,7 | 70,4 |
| C4 | 83,4 | 82,3 | 73,8 | 73,1 | 70,0 |
| C5 | 81,7 | | | | 69,4 |
| C6 | 83,0 | 82,8 | 80,5 | 78,8 | 78,7 |

1) Résultats non représentatifs : valeur aberrante

### 4.4.2.7 Azote total, ammoniacal et nitrique

Les teneurs en azote total (NTK), azote ammoniacal ($N\text{-}NH_4$) et azote nitrique ($N\text{-}NO_3$) des composts sont présentées aux tableaux 4.9, 4.10 et 4.11. On note pour l'ensemble des traitements, une fluctuation importante de la teneur en azote dans le temps pour un même compost. Cette variation est probablement liée aux nombreuses réactions de transformation de l'azote dans le temps et au sein de la masse, ainsi qu'au caractère volatil de la forme ammoniacale de cet élément et ce, en dépit des opérations d'homogénéisation par brassage avant l'échantillonnage multiple.

Les teneurs en azote au premier retournement (pour les composts C1, C3, C4, C5 et C6 échantillonnés le 16 juin) ne sont pas présentées en raison de problèmes liés à la conservation de ces échantillons.

Les teneurs initiales en azote total b.s. des fumiers varient de 2,4 à 3,7 % alors que les teneurs finales varient de 2,3 à 3,4 %. Les trois fumiers qui avaient les plus faibles

teneurs en azote (C1, C3 et C6) ont produit des composts dont la teneur en azote a augmenté en cours de compostage. On peut croire que la présence initiale d'une plus faible quantité d'azote dans le fumier se traduirait par de plus faibles pertes en cours de compostage.

**TABLEAU 4.9 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE TOTAL EN COURS DE COMPOSTAGE**

| Traitement | Teneurs en azote total b.s. (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | DÉBUT | Retournements | | | FIN |
| | | R1 | R2 | R3 | |
| C1 | 2,42 | | 2,38 | 3,73 | 2,89 |
| C2 | 3,17 | 2,87 | 3,30 | | 2,30 |
| C3 | 3,06 | | 3,70 | 4,95 | 3,38 |
| C4 | 3,52 | | 3,50 | 4,41 | 3,35 |
| C5 | 3,72 | | | | 3,07 |
| C6 | 2,42 | | 3,00 | 3,36 | 3,40 |

On observe une baisse généralisée de la teneur en $N\text{-}NH_4$ des composts en comparaison avec les teneurs initiales des fumiers frais à l'exception du fumier C1. Les teneurs en azote ammoniacal varient de 0,48 à 1,21 % pour les fumiers en début de compostage et de 0,29 à 0,88 % après une période de compostage d'environ 5 mois. À la fin des essais de compostage, la plus forte teneur de $N\text{-}NH_4$ a été observée pour le compost non retourné C5. Par ailleurs, Ott (1990) observe une diminution importante de la teneur en $N\text{-}NH_4$ en cours de compostage. Une réduction de 2 000 ppm à 100 ppm entre le fumier frais et le fumier composté de 4 mois a été constatée lors de ces essais (Ott, 1990).

## TABLEAU 4.10 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE AMMONIACAL EN COURS DE COMPOSTAGE

| Traitement | Teneurs en azote ammoniacal b.s. (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | DÉBUT | Retournements | | | FIN |
| | | R1 | R2 | R3 | |
| C1 | 0,48 | 0,32 | 0,50 | 1,00 | 0,49 |
| C2 | 0,86 | 0,91 | 1,41 | | 0,66 |
| C3 | 0,94 | 0,29 | 0,50 | 0,89 | 0,45 |
| C4 | 1,21 | 0,28 | 0,67 | 0,61 | 0,30 |
| C5 | 1,21 | | | | 0,88 |
| C6 | 0,48 | 0,26 | 0,73 | 0,59 | 0,29 |

Les teneurs en nitrates des substrats en cours de compostage sont présentées au tableau 4.11. Comme prévu, les teneurs initiales des fumiers en $N\text{-}NO_3$ sont pratiquement nulles. À la fin des essais de compostage, la teneur en $N\text{-}NO_3$ varie de 280 à 3 420 ppm. Pour des conditions d'expérimentation similaires (tas extérieur retourné), les teneurs en $N\text{-}NO_3$ finales s'apparentent aux valeurs obtenues par Ott (1990).

**TABLEAU 4.11 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE NITRIQUE EN COURS DE COMPOSTAGE**

| Traitement | Teneurs en azote nitrique b.s. (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | DÉBUT | Retournements | | | FIN |
| | | R1 | R2 | R3 | |
| C1 | 0,000 | 0,142 | 0,019 | 0,648 | 0,041 |
| C2 | | 0,000 | 0,063 | | 0,137 |
| C3 | 0,000 | 0,053 | 0,000 | 0,244 | 0,034 |
| C4 | 0,015 | 0,038 | 0,000 | | 0,028 |
| C5 | 0,015 | | | | 0,342 |
| C6 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,187 | 0,034 |

#### 4.4.2.8 Rapport C/N

Les valeurs de rapport C/N (carbone organique/azote total) en cours de compostage sont présentées au tableau 4.12. Les rapports C/N des fumiers de départ se situent entre 12,3 et 19,9. Lorsque les rapports C/N sont faibles (< à 30), les risques de pertes d'azote par volatilisation sont plus élevés. Kirchman (1985) établit le rapport C/N optimal pour limiter les pertes d'azote des fumiers à plus de 30.

À la fin des essais de compostage, les rapports C/N varient de 12,1 à 14,3. Des résultats similaires ont été obtenus par Jobin (1991). De façon générale, le C/N des composts tend à diminuer lors du compostage. Pour les fumiers des bovins laitiers, le C/N des traitements C1, C3, C4 et C6 a diminué en cours de compostage; le C/N des traitements C2 et C5 est demeuré sensiblement le même entre le début et la fin des essais.

La valeur absolue du C/N est difficilement utilisable pour établir la maturité des fumiers compostés puisque le C/N du fumier frais est habituellement inférieur à 25.

**TABLEAU 4.12 : ÉVOLUTION DES RAPPORTS C/N EN COURS DE COMPOSTAGE**

| Traitement | C/N | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | DÉBUT | Retournements | | | FIN |
| | | R1 | R2 | R3 | |
| C1 | 19,7 | | 17,9 | 11,5 | 14,3 |
| C2 | 12,3 | 12 | 9,3 | | 13,1 |
| C3 | 15,6 | | | 8,5 | 12,1 |
| C4 | 13,7 | | 12,2 | 9,6 | 12,1 |
| C5 | 12,7 | | | | 13,1 |
| C6 | 19,9 | | 15,6 | 13,6 | 13,4 |

#### 4.4.2.9 Phosphore

Le tableau 4.13 présente les teneurs en phosphore total (P tot.) des substrats en cours de compostage. Les teneurs initiales en P tot. des fumiers varient de 0,62 à 0,85 % et de 1,21 à 1,71 % dans le compost à la fin de la période d'essais. La teneur en phosphore du fumier essoré C2 est plus élevée (1,24 %) que celle des autres fumiers. On observe la même tendance à la fin des essais de compostage.

De façon générale, la teneur finale des composts en phosphore est deux fois plus élevée à la fin des essais qu'au départ. Pour le fumier essoré C2 et le compost statique C5, la teneur finale du compost en phosphore est 1,5 fois supérieure au contenu initial des fumiers. En posant l'hypothèse que les pertes de phosphore par lessivage sont faibles, la perte de masse des composts entraîne une concentration inévitable en cet élément dans le produit final.

Pour tous les fumiers à l'étude, le rapport N/P se situe dans la zone optimale comprise entre 2 et 5 (Mustin, 1987).

**TABLEAU 4.13 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN PHOSPHORE TOTAL EN COURS DE COMPOSTAGE**

| Traitement | Teneurs en phosphore total b.s. (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | DÉBUT | Retournements | | | FIN |
| | | R1 | R2 | R3 | |
| C1 | 0,75 | 0,78 | 0,95 | 1,25 | 1,49 |
| C2 | 1,24 | 1,28 | 1,58 | | 1,89 |
| C3 | 0,71 | 0,85 | 1,19 | 1,55 | 1,67 |
| C4 | 0,85 | 0,90 | 1,39 | 1,66 | 1,71 |
| C5 | 0,83 | | | | 1,21 |
| C6 | 0,62 | 0,81 | 0,99 | 1,23 | 1,35 |

### 4.4.2.10 Potassium

Les teneurs en potassium total b.s. (K tot.) sont présentées au tableau 4.14. Les teneurs initiales en K tot. des fumiers à l'essai varient grandement selon l'origine du fumier (1,91 à 3,66 %). À la fin de la période de compostage, les teneurs en K tot. des composts varient de 1,70 à 5,63 %. Ces teneurs en K tot. sont plus élevées pour les composts couverts (C1 et C2) que les composts non couverts (C3 à C6), parce que le potassium est un élément facilement lessivable. La teneur finale en K tot. du compost couvert C1 est de 5,63 % comparativement à 3,07 % pour le compost non couvert C6.

La teneur finale en K tot. du compost retourné (C4) est supérieure à celle du compost non retourné (C5).

**TABLEAU 4.14 : ÉVOLUTION DES TENEURS EN POTASSIUM TOTAL EN COURS DE COMPOSTAGE**

| Traitement | Teneur en potassium total b.s. (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | DÉBUT | Retournements | | | FIN |
| | | R1 | R2 | R3 | |
| C1 | 3,66 | 3,38 | 3,74 | 4,99 | 5,63 |
| C2 | 2,41 | 2,57 | 3,06 | | 3,38 |
| C3 | 1,91 | 2,27 | 2,19 | 2,76 | 2,55 |
| C4 | 1,91 | 2,03 | 2,21 | 2,45 | 2,11 |
| C5 | 2,16 | | | | 1,70 |
| C6 | 3,57 | 3,31 | 3,43 | 3,09 | 3,07 |

### 4.4.3 PERTES EN COURS DE COMPOSTAGE

L'oxydation de la matière organique lors du compostage entraîne des pertes inévitables de volume et de masse. Les masses totales, les teneurs en eau et en éléments fertilisants (N, P et K) des composts au début et à la fin des essais sont nécessaires pour déterminer les pertes en cours de compostage. Deux phénomènes distincts sont observés en cours de compostage: l'augmentation de la teneur en éléments fertilisants des composts engendrée par la perte de matière sèche du compost et les pertes par lessivage et volatilisation en cours de compostage. Si la teneur d'un élément particulier dans le compost à la fin du compostage est égale ou inférieure à celle du fumier en début de compostage, il y a assurément des pertes en cours de compostage. De plus, dans certains cas, même si la teneur d'un élément augmente en cours de compostage, il peut y avoir une perte de cet élément. L'effet des pertes est alors plus faible que l'effet de concentration.

Les masses humides de chaque fumier et compost ainsi que leurs teneurs en eau respectives au début et à la fin des essais sont présentées au tableau 4.15. À partir de ces données et de celles présentées aux tableaux 4.8 à 4.14, les pertes de masse d'eau, de matière sèche, de matière organique, d'azote, de potassium et de

phosphore sont calculées pour la période de compostage. Les pertes en phosphore et potassium ont également été calculées en considérant une autre approche basée sur le volume de lixiviats et sa teneur en ces éléments.

**TABLEAU 4.15 : MASSES ET TENEURS EN EAU DES FUMIERS ET DES COMPOSTS**

| Traitement | Valeur initiale Fumier | | Valeur finale Compost | |
|---|---|---|---|---|
| | Masse humide (kg) | TEE b.h. (%) | Masse humide (kg) | TEE b.h. (%) |
| C1 | 7 200 | 82,6 | 2 357 | 74,6 |
| C2 | 6 930 | 76,0 | 3 550 | 69,2 |
| C3 | 9 224 | 73,9 | 3 742 | 78,9 |
| C4 | 7 795 | 79,1 | 3 250 | 79,3 |
| C5 | 6 220 | 77,3 | 3 600 | 79,5 |
| C6 | 6 790 | 81,2 | 3 289 | 82,4 |

Les pertes de volume, de masse, de matière organique, d'azote, de phosphore et de potassium encourues lors du compostage et calculées par bilans massiques, sont présentées au tableau 4.16 à la colonne A. La colonne B, montre les pertes calculées par la charge totale du lixiviat (fig. 4.9b et 4.9c). Cette méthode de calcul est décrite à la section 4.4.6.

## TABLEAU 4.16 : PERTES EN COURS DE COMPOSTAGE

| Traitement | Durée (j) | PERTES (%) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Volume | Masse totale | Matière organique | N | P | | K | |
| | | | | | | A | B | A | B |
| C1 | 138 | 50 | 67 | 59 | 43 | 5 | | 27 | |
| C2 | 97 | 44 | 49 | 49 | 52 | < 0 | < 1 | 8 | |
| C3 | 140 | 57 | 59 | 72 | 64 | 22 | 4,6 | 56 | 42 |
| C4 | 144 | 54 | 58 | 65 | 61 | 17 | 3,9 | 54 | 42 |
| C5 | 144 | 27 | 42 | 56 | 57 | 24 | 4,3 | 59 | 40 |
| C6 | 138 | 47 | 52 | 57 | 37 | 0,5 | 11 | 61 | 59 |

A: pertes calculées par la méthode du bilan massique
B: pertes calculées par la méthode de la charge cumulée de l'élément dans le lixiviat

### 4.4.3.1 Volume

La perte de volume pour l'ensemble des composts varie de 27 à 57 %. Pour les composts retournés (C1, C3, C4 et C6), la réduction moyenne du volume est de 52 % alors qu'elle est de 27 % pour le compost non retourné C5.

La réduction du volume du compost essoré C2 (couvert et retourné) est plus faible (44 %) que pour les autres traitements retournés (52 %), mais le temps de compostage a été plus court (97 jours vs 141 jours). Le taux journalier moyen de réduction de volume s'avère plus important avec le traitement C2 qu'avec tous les autres traitements (0,45 %/j vs 0,33 %/j).

L'évolution des volumes des piles de compost en cours de compostage est présentée à la figure 4.6. Le temps 0 (T0) ne correspond pas à la même date du début du compostage pour tous les traitements.

#### 4.4.3.2 Masse totale

Les pertes de masse varient, pour l'ensemble des traitements, de 42 à 67 %. La plus forte réduction de masse est mesurée avec le compost C1 (couvert et retourné) alors que le compost non retourné C5 présente la plus faible perte de masse. Pour l'ensemble des composts retournés et non couverts (C3, C4 et C6), la réduction moyenne de la masse de fumier s'établie à 56 %. BIOREX (1994) présente des pertes de masse de 73 % après 4 mois de compostage en andain pour un fumier retourné et un fumier non retourné.

Les pertes de masse sont supérieures aux pertes de volume. En conséquence, la masse volumique apparente sur base humide (MVA b.h.) des composts est plus faible que celle des fumiers. La MVA b.h. moyenne des fumiers en début de compostage est de 817 kg/m$^3$. Pour les composts C3, C4 et C6 (retournés et non couverts), la MVA b.h. moyenne à la fin des essais est de 739 kg/m$^3$ et de 632 kg/m$^3$ pour le compost non retourné C5. Le compost retourné et couvert C1 a la plus faible MVA b.h. qui est de 561 kg/m$^3$.

#### 4.4.3.3 Matière organique

La perte de matière organique pour l'ensemble des traitements varie de 49 à 72 %. Pour les composts retournés et non couverts (C3, C4 et C6), la perte de matière organique moyenne est de 65 %.

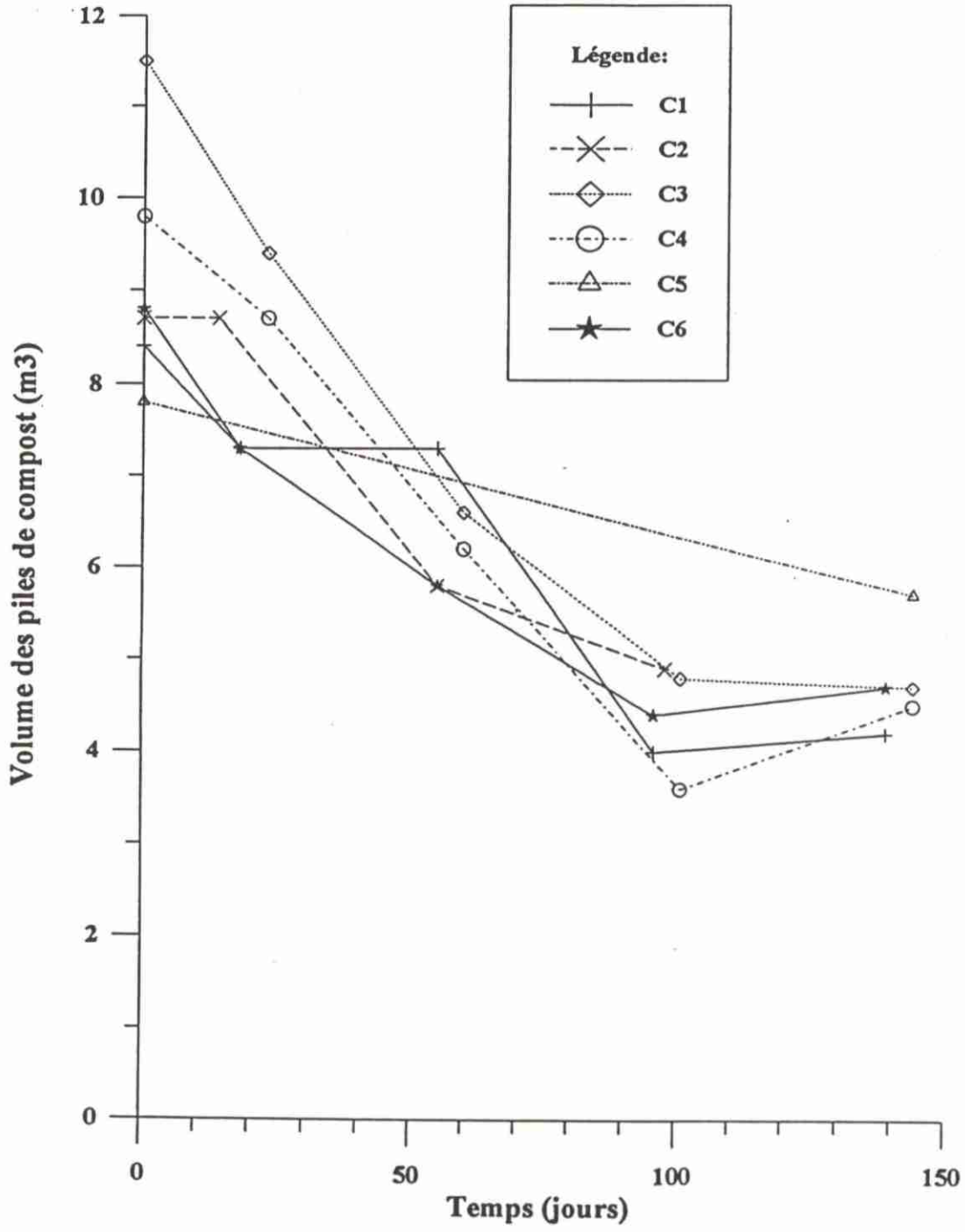



Figure 4.6 : Évolution du volume des piles de compost en fonction du temps

Ceci correspond a une perte moyenne quotidienne de matière organique (basée sur la durée totale du compostage) de 0,46 %/j. Elle est maximale pour le compost C2 (fumier essoré) et correspond à 0,50 %/j, alors qu'elle est minimale pour le compost non retourné C5 qui a perdu 0,39 %/j.. Selon ce critère, le compostage du fumier C2 s'avère le plus rapide.

La perte de matière organique est suggérée par certains auteurs pour l'évaluation de la maturité des composts. Le compost sera jugé mûr lorsque la réduction de la masse de matière organique excède 60 % (Mathur, 1993).

#### 4.4.3.4 Phosphore

Des trois éléments fertilisants majeurs (N-P-K), le phosphore est l'élément qui présente les pertes en cours de compostage les plus faibles. Pour l'ensemble des traitements et selon les deux méthodes de calculs (bilan massique du compost et charge cumulée dans le lixiviat, voir section 4.4.6), les pertes de phosphore varient de 0 à 24 %. Elle est maximale pour le compost non-retourné C5 sans que l'on puisse en expliquer la raison. Le calcul des pertes de phosphore pour le compost C6 par l'approche bilan génère une valeur qui nous apparaît très faible (1 %). Par la méthode de calcul de la perte par la charge cumulée de l'élément dans le lixiviat, les pertes sont estimées à plus de 11 %.

Les différences obtenues entre les deux méthodes de calcul ne s'expliquent que par des erreurs de manipulations inhérentes à ce genre d'expérimentations que ce soit lors de l'échantillonnage ou lors de l'analyse. Le faible nombre d'échantillons de lixiviat des composts couverts (C1: 3 échantillons et C2: 2 échantillons) ne nous permet pas de calculer des pertes par la charge cumulée dans le lixiviat de façon précise. De façon générale, les pertes de phosphore des composts couverts sont plus faibles que ceux des composts non couverts pour les deux approches utilisées.

Pour sa part BIOREX (1994) présente des pertes de phosphore comprise entre 0,8 et 1,7 %. Jobin (1991) ne mesure aucune perte importante de phosphore durant ces essais. Des différences entre les fumiers utilisés pour nos essais et ceux de BIOREX (1994) et Jobin (1991) expliqueraient les différences obtenus pour les pertes de phosphore. Pour nos essais, l'entreposage des fumiers s'est fait de façon générale sur une très courte période (moins de 1 mois). Pour BIOREX (1994) et Jobin (1991), le fumier a été entreposé sur une plus longue période ($\approx$ 6 mois).

Pour l'entreposage des fumiers à la ferme, BIOREX a mesuré des pertes de phosphore de 18 et 26 %, principalement dans le purin qui s'est écoulé du fumier, provenant des deux fermes à l'étude. On constate alors que les fumiers de BIOREX se seraient lessivés surtout à l'entreposage, tandis que les fumiers utilisés au CRIQ auraient été peu lessivés à l'entreposage, mais davantage lors du compostage.

#### 4.4.3.5 Potassium

Comparativement aux pertes en phosphore, celles en potassium sont beaucoup plus importantes, et ce pour tous les traitements. Pour les composts non couverts (C3 à C6) ces pertes varient de 54 à 61 % par la méthode de calcul du bilan massique et de 42 à 59 % par la méthode de la charge cumulée dans le lixiviat. Pour les composts couverts (C1 et C2) les pertes sont respectivement 8 et 27 % (par la méthode de calcul du bilan massique). Les pertes de potassium sont attribuables en grande partie au lessivage que subit cet élément en cours de compostage à la suite des précipitations.

Pour la méthode de calcul par bilan massique, une légère différence est obtenue avec le traitement retourné C4 (54 %) et le traitement non retourné C5 (59 %) concernant les pertes de potassium. Par contre, pour cet élément, BIOREX (1994) obtient des résultats différents, soit des pertes de 22 et 39 % pour respectivement des andains retournés 1 fois (116 jours) et retournés 4 fois (150 jours). Une période d'entreposage du fumier utilisé au CRIQ plus courte et un lessivage moins important au cours de cette période sont des raisons qui explique ces différences. De plus, plusieurs paramètres influencent l'ampleur des pertes de potassium par lessivage : intensité et quantité des précipitations, TEE initiale du compost, grosseur et forme de l'andain, etc. Ces différences s'expliquent en partie par l'humidité plus faible des fumiers utilisés par BIOREX qui étaient de 70 et 76 % en début de compostage pour respectivement l'andain retourné 1 fois et l'andain retourné 4 fois.

#### 4.4.3.6 Azote

Des pertes d'azote variant de 37 à 64 % ont été mesurées pour l'ensemble des traitements. La perte d'azote la plus importante a été obtenue avec le compost C3 (64 %). Les pertes les plus faibles sont associées aux composts (C1 et C6) qui avaient les rapports C/N initiaux les plus élevés ($C/N \approx 20$).

De plus, il semble y avoir une certaine relation entre la température et l'ampleur des pertes en azote encourues en cours de compostage. La plus faible perte en azote est associée au compost dont la température n'a jamais excédé 45 °C (C6). Les plus fortes pertes en azote correspondent aux températures maximales les plus élevées obtenues en cours de compostage (C3, C4 et C5).

Pour les composts retournés non couverts (C3, C4 et C6), la moyenne des pertes en azote est de 54 %. Jobin (1991) fait état des pertes d'azote en cours de compostage évaluées entre 50 et 69 % pour des andains aux champs de 3 m de long par 2 m de large et 1,1 m de haut. BIOREX (1994) présente des pertes d'azote de respectivement 43 et 35 % pour les andains pleine grandeur aux champs, non retournés et retournés.

Le protocole expérimental utilisé ne permet pas d'établir précisément la proportion d'azote qui s'est volatilisée (sous forme de $N\text{-}NH_3$ et de $N_2$) par rapport à l'ensemble des pertes en azote. Par contre, en connaissant la masse d'azote qui se retrouve dans les lixiviats et la masse totale d'azote perdue pour la période complète des essais, les pertes en azote par lixiviation peuvent être estimées. L'azote qui se retrouve dans les lixiviats est calculée à partir des analyses de teneur et des volumes récoltés de chaque lixiviat (de la grille centrale et de la grille de pourtour). Pour ces essais (C3, C4 et C6), la proportion d'azote lessivé serait comprise entre 16 et 20 %; le reste des pertes d'azote étant sous forme de volatilisation. Pour les traitements C3 à C5, l'azote lessivé représenterait entre 8 et 15 % des pertes totales d'azote. Pour le traitement C6, une proportion plus forte d'azote a été perdue par lixiviation (37 %). Pour les composts couverts, l'azote lessivé représenterait entre 2 et 8 % des pertes totales d'azote. Des résultats différents ont été obtenus par BIOREX (1994). Avec un fumier très pailleux sans retournement, une proportion d'azote lessivé par rapport aux pertes totales de 7 % a été obtenue. Pour un fumier moyennement pailleux avec retournement 41 % de l'azote est lessivé.

### 4.4.3.7 Aspects économiques des pertes en éléments majeurs

Le coût des pertes en azote, phosphore et potassium ($N\text{-}P_2O_5\text{-}K_2O$) constitue un aspect à évaluer pour différentes techniques de compostage.

On retrouve au tableau 4.17 le coût de différents engrais simples commerciaux ainsi que le coût unitaire de l'élément fertilisant qui s'y rapporte. L'unité d'azote total est évaluée à 0,94 $/kg, celle du phosphore ($P_2O_5$) à 0,81 $/kg et à 0,48 $/kg pour le

potassium ($K_2O$). Les coûts d'engrais minéraux simples ont été obtenus d'un fabricant de la région de Québec en 1993.

Des trois éléments majeurs contenus dans le fumier de départ, les pertes monétaires en azote lors du compostage sont les plus importantes. Les pertes en potassium ($K_2O$) viennent au second rang alors que celles en phosphore ($P_2O_5$) sont monétairement les moins importantes.

## TABLEAU 4.17 : COÛTS DES ÉLÉMENTS FERTILISANTS

| Engrais | Prix | |
|---|---|---|
| | ($ / t.m. d'engrais) | ($ / kg d'unité fertilisante) |
| Urée (46 - 0 - 0) | 381 | 0,83 [1] |
| Nitrate d'ammoniaque (34 - 0 - 0) | 355 | 1,04 [1] |
| Superphosphate triple (0 - 46 - 0) | 371 | 0,81 [2] |
| Muriate de potasse (0 - 0 - 60) | 290 | 0,48 [3] |

1) en Ntot 2) en $P_2O_5$ 3) en $K_2O$
Source: Nutrite Inc., Sainte-Foy, 23 décembre 1993

La valeur monétaire des pertes en azote, phosphore et potassium obtenues lors du compostage est présentée au tableau 4.18. Les montants sont calculés à partir des quantités de N, $P_2O_5$ et $K_2O$ perdues par rapport à leur contenu initial dans les fumiers de départ (calculés selon la méthode du bilan massique, tableau 4.16 colonne A)

## TABLEAU 4.18 : VALEUR MONÉTAIRE DES PERTES EN ÉLÉMENTS MAJEURS OBTENUES LORS DU COMPOSTAGE

| Élément | Pertes ($ / t.m. de fumier) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
| Azote (N) | 1,70 | 3,74 | 4,78 | 4,19 | 4,50 | 1,56 |
| Phosphore ($P_2O_5$) | 0,12 | 0,00 | 0,78 | 0,55 | 0,83 | 0,02 |
| Potassium ($K_2O$) | 0,98 | 0,26 | 1,63 | 1,26 | 1,68 | 2,38 |
| Total | 2,80 | 4,00 | 7,19 | 6,00 | 7,01 | 3,96 |

On retrouve au tableau 4.19 la valeur monétaire des pertes en éléments majeurs lors du compostage pour une ferme moyenne. Les valeurs de ce tableau sont basées sur une production annuelle de 474 t.m. de fumier à la reprise après l'entreposage hivernale des fumiers (BIOREX, 1989) et sur les valeurs du tableau 4.18.

Pour la ferme moyenne, la valeur monétaire des pertes d'azote se situerait entre 739 et 2 266 $, tandis que la valeur monétaire des pertes se situeraient entre 0 et 393 $ pour le phosphore et entre 123 et 1 128 $ pour le potassium. Pour cet élément la valeur monétaire des pertes des composts non-couverts (C3 à C6) est deux fois plus grande que celle du compost couvert C1. Au total, pour les trois éléments fertilisants majeurs, la valeur monétaire des pertes se situerait entre 1 328 et 3 409 $ pour les six composts à l'étude.

**TABLEAU 4.19 : VALEUR MONÉTAIRE À LA FERME DES PERTES EN ÉLÉMENTS MAJEURS OBTENUES LORS DU COMPOSTAGE**

| Élément | Pertes ($ / ferme moyenne +) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
| Azote (N) | 806 | 1 773 | 2 266 | 1 986 | 2 133 | 739 |
| Phosphore ($P_2O_5$) | 57 | 0 | 370 | 261 | 393 | 10 |
| Potassium ($K_2O$) | 465 | 123 | 773 | 597 | 796 | 1 128 |
| TOTAL | 1 328 | 1 896 | 3 409 | 2 844 | 3 322 | 1 877 |

+ : 474 tonnes métriques de fumier à la reprise (BIOREX, 1994)

### 4.4.4 CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS

Les structures étanches utilisées lors du compostage permettent de récolter deux types de lixiviats, soit les lixiviats issus directement du drainage naturel des composts (grille centrale située directement sous le compost) et les lixiviats dilués par les précipitations qui s'écoulent des tas de compost sur le plancher de béton.

Dans le cadre des essais sur plate-forme de béton, les caractéristiques des lixiviats présentées portent uniquement sur les lixiviats non dilués récoltés à la grille centrale. Les tableaux 4.20 à 4.22 présentent les teneurs maximales, minimales et moyennes de ce type de lixiviat. Les caractéristiques de chacun des lixiviats sont présentées en annexe.

Le tableau 4.20 présente les caractéristiques des lixiviats récoltés sous le compost C4 48 heures suivant la mise en tas à l'aide d'un épandeur à fumier et pour le compost C5 non retourné. Le fumier C5 a été disposé directement sur la plate-forme sans homogénéisation avec l'épandeur. Entre la mise en tas et l'échantillonnage de ce lixiviat, il n'est pas tombé de pluie. Il s'agit donc de l'excès d'eau du fumier qui s'est drainée suite à l'andainage.

**TABLEAU 4.20 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS DES FUMIERS EN DÉBUT DE COMPOSTAGE SUITE A LA MISE EN ANDAIN**

| Paramètres | Teneurs | |
|---|---|---|
| | C4 Mise en andain avec épandeur | C5 Mise en andain avec benne basculante |
| NTK b.h. (mg/kg) | 4 110 | 1 100 |
| $NH_4$ b.h. (mg/kg) | 2 370 | 730 |
| $NO_3$ b.h. (mg/kg) | 14,5 | 11,65 |
| Ptot b.h. (mg/kg) | 778,0 | 78,0 |
| Ktot b.h. (mg/kg) | 4 594 | 1 725 |
| $DBO_5$ (mg $O_2$/L) | 34 360 | 8 648 |
| DCO (mg $O_2$/L) | 74 423 | 15 939 |
| COLI. TOT. (#/100 mL) | 4,6E+08 | 4,6E+07 |
| COLI. FEC. (#/100 mL) | 4,6E+08 | 4,6E+07 |
| pH | 7,75 | 7,98 |
| Cond. élec. (mS/cm) | 20 | 9,8 |
| Teneur en eau b.h. (%) | 94,2 | 98,7 |
| M.E.S. (mg/L) | 23 300 | 1 200 |

Les teneurs du lixiviat du compost non retourné C5 sont plus faibles en comparaison de celles mesurées pour le compost C4 de même origine. La mise en tas avec l'épandeur comparativement à l'utilisation de la benne basculante constitue le principal facteur pouvant expliquer ces différences.

Des teneurs en azote total et ammoniacal, en potassium total, des $DBO_5$ et des DCO de 3 à 4 fois supérieurs ont été mesurés dans le lixiviat du compost C4 retournés par rapport au lixiviat du compost non retournés C5. Pour le phosphore total, la teneur de cet élément dans le lixiviat de C4 est 10 fois plus élevé comparativement à C5. Le brassage du fumier lors de la mise en andain a favorisé

l'écoulement d'un lixiviat dont la teneur en éléments (N, P, K, DCO, $DBO_5$) est plus élevée.

Nous retrouvons au tableau 4.21, les caractéristiques des lixiviats récoltés au cours de la période de compostage qui sont issus des deux composts couverts (C1 et C2).

**TABLEAU 4.21 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS PRÉLEVÉS SOUS LES COMPOSTS COUVERTS (C1 ET C2) POUR LA DURÉE TOTALE DES ESSAIS**

| Paramètres | Teneur | | |
|---|---|---|---|
| | Minimale | Maximale | Moyenne [A] |
| NTK b.h. (mg/kg) | 160 | 3 830 | 2 000 |
| $NH_4$ b.h. (mg/kg) | 40 | 2 540 | 1 430 |
| $NO_3$ b.h. (mg/kg) | 0,00 | 23,37 | 5,39 |
| Ptot b.h. (mg/kg) | 23,9 | 424,0 | 179,7 |
| Ktot b.h. (mg/kg) | 1 204 | 10 059 | 5 730 |
| $DBO_5$ (mg $O_2$/L) | 178 | 25 120 | 10 791 |
| DCO (mg $O_2$/L) | 4 047 | 59 538 | 30 118 |
| COLI. TOT. (#/100 mL) | 4,3E+03 | 1,5E+08 | 3,8E+07 |
| COLI. FEC. (#/100 mL) | 3,0E+02 | 9,3E+07 | 2,3E+07 |
| pH | 7,41 | 9,32 | 8,33 |
| Cond. élec. (mS/cm) | 3,51 | 28,60 | 20,65 |
| Teneur en eau b.h. (%) | 94,8 | 99,5 | 96,91 |
| M.E.S. (mg/L) | 100 | 13 900 | 3 700 |

A) Nombre d'échantillons : 5 (3 éch. pour C1 et 2 éch. pour C2).

Les teneurs minimales du tableau 4.21 correspondent au lixiviat issu du compost C1 après trois mois de compostage (annexe C). Pour le compost C1, la teneur du lixiviat a diminué progressivement en cours de compostage. Les valeurs maximales de teneur ont été obtenues en début de compostage pour le compost C1. Le lixiviat du compost couvert C1 a été en général plus chargé en début de compostage qu'à la fin.

Les valeurs présentées au tableau 4.22 proviennent des quatre composts non couverts (C3 à C6) et représentent les caractéristiques des lixiviats obtenus sous les composts en cours d'essais suite aux précipitations. Les lixiviats de chaque compost ont été prélevés cinq fois après 44, 58, 104, 139 et 143 jours de compostage. Ces échantillons correspondent aux lixiviats écoulés durant les 24 ou 48 dernières heures avant le prélèvement.

**TABLEAU 4.22 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS PRÉLEVÉS SOUS LES COMPOSTS NON COUVERTS APRÈS LES PRÉCIPITATIONS (C3 À C6)**

| Paramètres | Teneur | | |
|---|---|---|---|
| | Minimale | Maximale | Moyenne [A] |
| NTK b.h. (mg/kg) | 280 | 3 600 | 1 370 |
| $NH_4$ b.h. (mg/kg) | 12 | 2 290 | 680 |
| $NO_3$ b.h. (mg/kg) | 0 | 1 009 | 108 |
| Ptot b.h. (mg/kg) | 49,4 | 207,0 | 103,2 |
| Ktot b.h. (mg/kg) | 1 862 | 7 914 | 4 855 |
| $DBO_5$ (mg $O_2$/L) | 94 | 16 854 | 3 023 |
| DCO (mg $O_2$/L) | 6 353 | 47 619 | 20 775 |
| COLI. TOT. (#/100 mL) | 2,3E+04 | 4,6E+06 | 1,1E+06 |
| COLI. FEC. (#/100 mL) | 3,0E+02 | 3,0E+05 | 7,2E+04 |
| pH | 8,00 | 9,70 | 8,71 |
| Cond. élec. (mS/cm) | 6,23 | 28,20 | 16,00 |
| Teneur en eau b.h. (%) | 95,2 | 99,1 | 97,5 |
| M.E.S. (mg/L) | 100 | 3 500 | 800 |

A) Nombre d'échantillons : 20

L'interprétation des valeurs du tableau 4.22 est rendue difficile en raison du nombre de variables qui influencent les valeurs des paramètres à l'étude : la composition des composts, le nombre de retournements, la quantité et l'intensité des précipitations et l'évolution des composts dans le temps. Pour ces mêmes raisons, les écarts de valeurs sont très importants. Il faut de plus noter, qu'il n'y a pas eu d'échantillons de prélever les jours ou il n'y a pas eu de pluie. Ces lixiviats étaient forts probablement plus concentrés que ceux récoltés suite au précipitations. Il apparaît très probable que les teneurs en P et K moyennes du lixiviat qui s'écoule du compost et les pertes de P et K (tableau 4.16) ont été, pour cette raison, sous évaluées.

Aucune des concentrations minimales pour les lixiviats des composts non couverts proviennent de lixiviats prélevés en début de compostage. Au contraire, ces valeurs minimales correspondent aux échantillons recueillis à la fin des essais. Les caractéristiques des lixiviats écoulés du compost C5 en cours de compostage ne sont pas différentes des lixiviats des composts C3, C4 et C6 contrairement aux lixiviats des fumiers (cf. tableau 4.20).

Le compost C3 (2 kg de litière/u.a.-j) a généré des lixiviats plus concentrés au début (annexe C) et en cours de compostage que les autres composts. De façon plus particulière, le lixiviat du compost C4 (6,4 kg de litière/u.a.-j) est moins concentré que celui du compost C3. À la lumière de ces informations, on constate qu'une utilisation importante de litière (6,4 kg / u.a.-j) dans le fumier favorise une diminution de la teneur des lixiviats en cours de compostage.

Les caractéristiques des lixiviats des traitements non couverts et retournés qui se sont écoulés à la grille centrale sont présentées aux figures 4.7a, 4.7b et 4.7c. Les valeurs présentées à ces trois figures incluent les caractéristiques des lixiviats qui se sont écoulés dès la mise en tas des fumiers (tableau 4.20) et celles récoltées par la suite (tableau 4.22).

Ces graphiques et ces tableaux indiquent que le lixiviat qui s'écoule en début de compostage (tableau 4.20) est plus concentré en azote total, ammoniacal et nitrique ainsi qu'en phosphore que celui qui s'écoule par la suite (tableau 4.22). Quant à la teneur en potassium et la conductivité électrique du lixiviat, celles-ci sont demeurées élevées tout au cours des essais de compostage. Des baisses importantes de teneur sont remarquées entre le lixiviat qui s'est écoulé du fumier et le lixiviat qui s'est écoulé par la suite en cours de compostage notamment pour la DCO et la $DBO_5$, les coliformes fécaux et totaux et les MES. Après plus de 100 jours de compostage, la $DBO_5$ est presque nulle (< 100 mg $O_2$/L). À l'inverse, le pH du lixiviat a tendance à augmenter en cours de compostage.

Par ailleurs, en comparant les valeurs du tableau 4.21 avec celles du tableau 4.22, nous constatons que la teneur moyenne des lixiviats des composts couverts est toujours plus élevée que celle des lixiviats provenant des composts non couverts. La seule exception concerne la teneur moyenne en nitrates qui est plus élevée dans les lixiviats provenant des composts non couverts.

Finalement, des diminutions importantes de coliformes fécaux sont observées dans les lixiviats suite au compostage. Leur teneur est en moyenne moins élevée d'un facteur $10^4$ dans le lixiviat produit durant le compostage que dans le lixiviat généré en début de compostage (fig 4.7c).

Bien que ces essais comportaient plusieurs paramètres variables (intensité et volume des précipitations, durée du compostage, caractéristiques du fumier en début de compostage...), nous avons établi aux figures 4.7a, 4.7b et 4.7c les courbes de régression de neuf caractéristiques des lixiviats écoulés sous les composts à la grille centrale pour les traitements non-couverts et retournés en fonction du temps de compostage. Pour certains paramètres, tel que le potassium total, le phosphore total, la conductivité électrique et le pH, le coefficient de corrélation $R^2$ indique que l'équation de régression n'est pas significative. Pour les autres paramètres (azote total, $DBO_5$, DCO, MES et coliformes fécaux), l'équation de régression est significative, malgré la variabilité des paramètres expérimentaux. Les lixiviats du compost C5 **non-retourné** et non-couvert n'a pas fait l'objet de ces calculs à cause des différences observées par rapport aux lixiviats des composts **retournés** C3, C4 et C6.

Pour les fumiers avec compostage en andains au champs, le risque environnemental est en général plus élevé en début de compostage qu'à la fin et ce pour des conditions semblables (même teneur en eau et en éléments fertilisants dans le fumier, même quantité de précipitations...). Le risque environnemental est aussi associé à la quantité d'eau reçue par le compost sous forme de précipitations en cours de compostage et lors de la période de maturation.

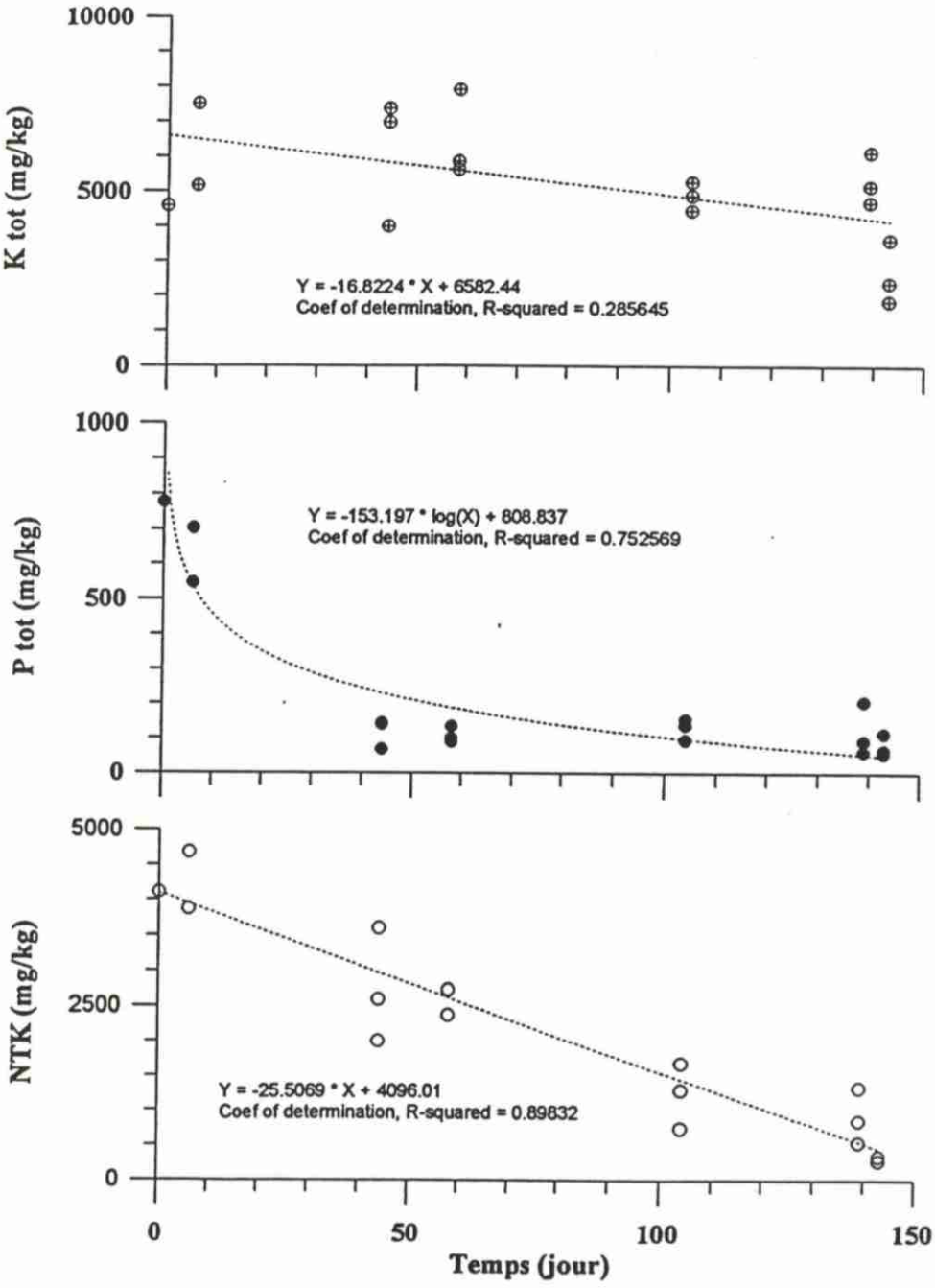



**Figure 4.7a : Caractéristiques des lixiviats des composts non-couverts et retournés en fonction du temps**

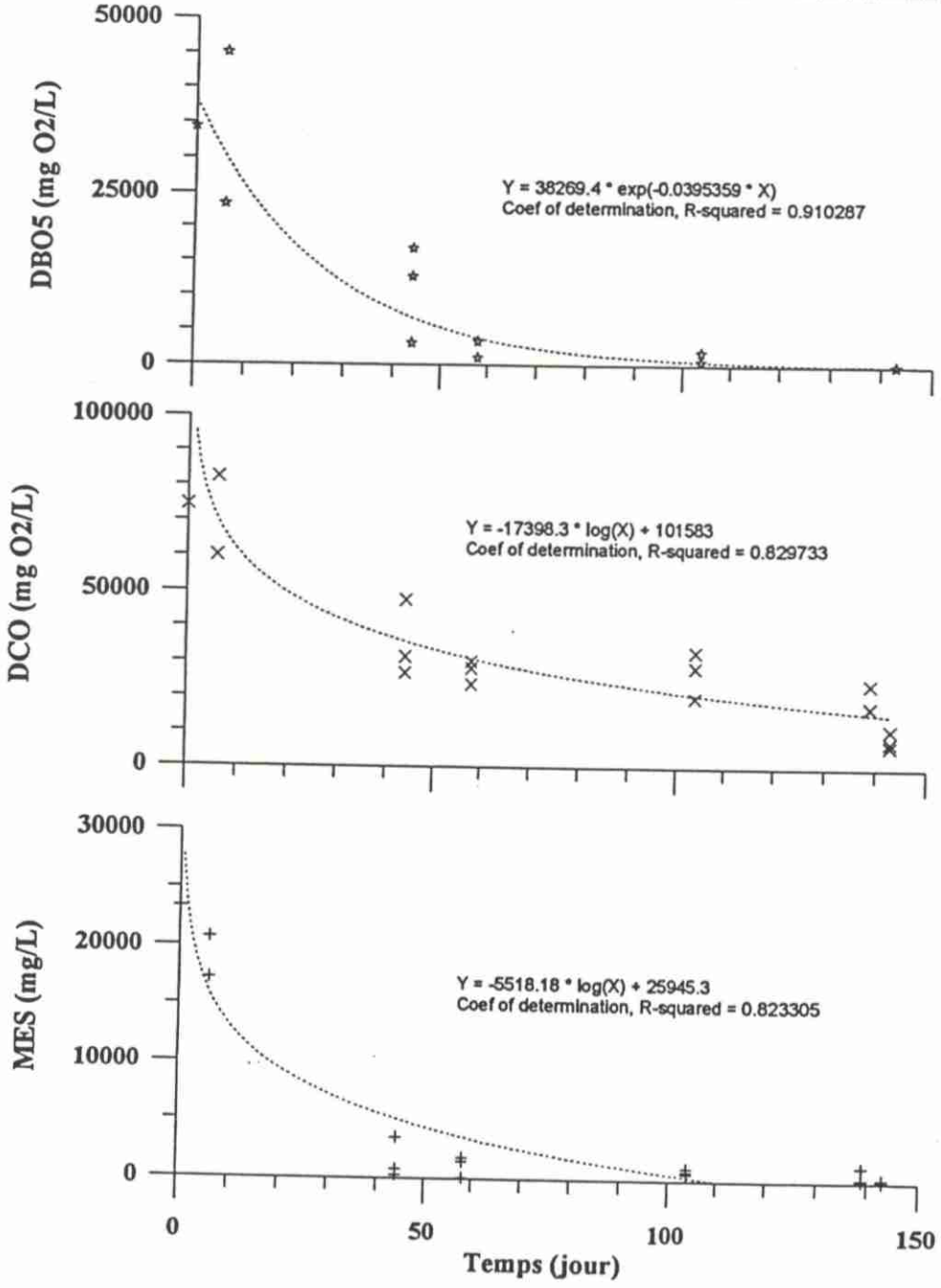



**Figure 4.7b : Caractéristiques des lixiviats des composts non-couverts et retournés en fonction du temps**

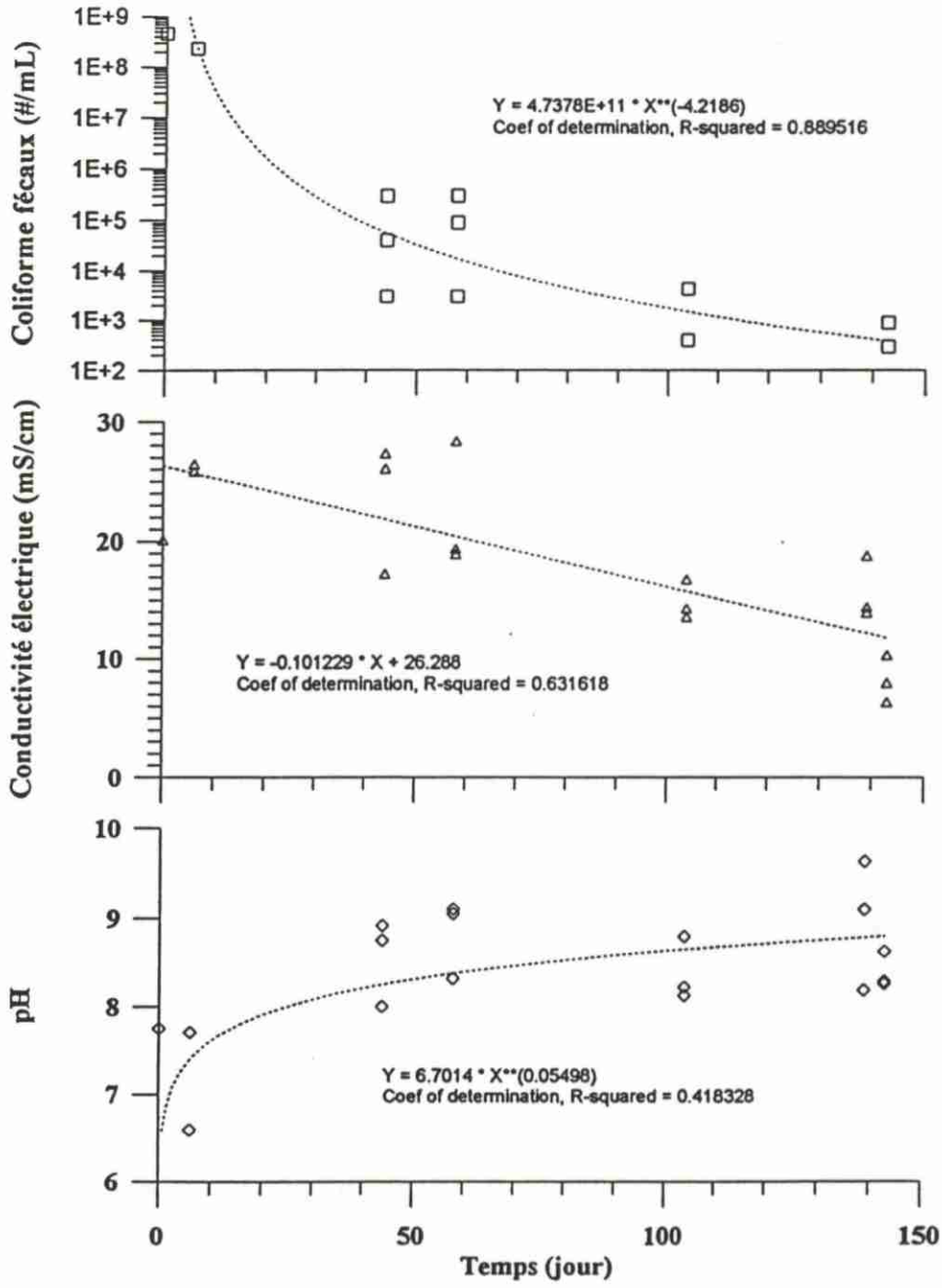



**Figure 4.7c : Caractéristiques des lixiviats des composts non-couverts et retournés en fonction du temps**

### 4.4.5 BILAN DE L'EAU

En connaissant les masses d'eau initiales et finales présentes dans les composts et la masse de lixiviats perdue par écoulement, on peut établir dans un premier temps la quantité d'eau totale perdue en cours de compostage et dans un second temps, la proportion massique d'eau perdue par lixiviation ou évaporation par rapport aux pertes totales pour les traitements couverts.

Pour les traitements non couverts, en raison des précipitations, le bilan est plus complexe à établir. Il faut alors tenir compte de l'eau reçue sur les composts et sur la surface de béton de la plate-forme libre de compost.

Les calculs de bilan d'eau tiennent compte de la masse d'eau produite par oxydation de la matière organique durant le compostage bien que ce dernier paramètre n'a pas fait l'objet de mesures lors des essais. En posant comme hypothèses que la TEE du fumier est de 80 %, la matière organique b.s. est de 80 %, qu'il y a 60 % de perte de matière organique durant une saison de compostage et que la matière organique est entièrement constituée de glucose ($C_6H_{12}O_6$), l'équivalent de 58 kg d'eau par tonne de fumier (à la teneur en eau de départ) serait théoriquement produite par biooxydation de matière organique (ou encore 0,6 kg eau produite par kg de matière organique dégradé). Pour chacun des fumiers, nous avons calculé la quantité d'eau ainsi produite en fonction de la teneur en eau et en matière organique de chacun des fumiers. Ces valeurs apparaissent au tableau 4.23.

#### 4.4.5.1 Composts non couverts

Les lixiviats obtenus en cours de compostage proviennent du drainage naturel des fumiers humides en début de compostage, ainsi que des eaux de pluie qui pénètrent dans la masse de compost et se drainent subséquemment, ou ruissellent à la surface des composts.

Le tableau 4.23 présente, pour l'ensemble des composts non couverts, les données de base qui permettent d'établir le bilan global de l'eau pour chaque compost. On y retrouve également la surface moyenne occupée par les piles de compost lors des essais de compostage (A). Cette valeur tient compte de la surface occupée par chaque tas de compost entre les retournements et du nombre de jours correspondant.

La précipitation totale tombée pendant la période de compostage (B) sur les plates-formes a été de 613,5 mm pour les traitements C4 et C5 et de 605,9 mm pour C3 et C6. La précipitation moyenne enregistrée à l'aéroport international Jean Lesage (Station météorologique d'Environnement Canada) pour cette période (23 mai au 14 octobre) est de 526,2 mm. Les précipitations du mois de juillet ont été particulièrement importantes soit 252 mm alors que la normale mensuelle est de 110 mm (Environnement Canada, 1992). Les précipitations totales tombées sur les plates-formes (surface = 35,17 $m^2$) au cours des essais correspondent à un volume d'eau (C) variant de 21 309 à 21 577 litres selon la durée de compostage.

Les volumes de lixiviats récoltés dans les bassins de pourtour (D) et ceux de la grille centrale (E) sont également indiqués au tableau 4.23.

## TABLEAU 4.23 : PARAMÈTRES DU BILAN D'EAU POUR LES TRAITEMENTS NON COUVERTS

| Paramètres | Code | Équation | Traitements | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | C3 | C4 | C5 | C6 |
| Surface des tas ($m^2$) | A | $\Sigma \frac{(A_i * \text{Durée}_i)}{\text{Durée totale}}$ | 14,1 | 13,5 | 13,9 | 11,5 |
| Précipitation totale (mm) | B | | 605,9 | 613,5 | 613,5 | 605,9 |
| Volume total de précipitation reçu sur une plate-forme (L) | C | 35,17 * B | 21 309 | 21 577 | 21 577 | 21 309 |
| Volume de lixiviats récolté dans le bassin de pourtour (L) | D | | 15 720 | 14 612 | 16 131 | 16 891 |
| Volume de lixiviats récolté à la grille centrale (L) | E | | 995 | 842 | 729 | 1 199 |
| Volume total de lixiviats récolté sur plate-forme *incluant béton* (L) | F | D + E | 16 715 | 15 454 | 16 860 | 18 090 |
| Volume d'eau théorique tombé sur la grille centrale libre de compost (L) | G | B * 1,7 | 1 030 | 1 043 | 1 043 | 1 030 |
| Volume de précipitation tombé sur la surface de compost (L) | H | $\Sigma (A_i * B_i)$ | 8 674 | 8 317 | 8 430 | 7 139 |
| Volume de précipitation tombé sur la surface de béton libre (L) | I | C - H | 12 632 | 13 257 | 13 143 | 14 167 |
| Volume de lixiviats total récolté de la pile de compost *excluant béton* (L) | J | F - I | 4 083 | 2 197 | 3 717 | 3 923 |
| Masse humide initiale du fumier (kg) | K | | 9 224 | 7 795 | 6 220 | 6 790 |
| Masse d'eau initiale du fumier (kg) | L | | 6 817 | 6 166 | 4 802 | 5 513 |
| Masse d'eau finale du compost (kg) | M | | 2 950 | 2 576 | 2 860 | 2 711 |
| Bilan de masse d'eau début - fin (kg) | N | L - M | 3 867 | 3 590 | 1 942 | 2 802 |
| Masse d'eau perdue totale (kg) | O | N + H + Q | 13 262 | 12 402 | 10 858 | 10 132 |
| Masse d'eau évaporée (kg) | P | O - J | 9 179 | 10 205 | 7 141 | 6 209 |
| Eau biologique produite (kg) par oxydation de la matière organique | Q | voir sect. 4.4.5 | 852 | 530 | 388 | 362 |

$A_i$ : Surface du tas pour une période de temps donnée, entre deux retournements
$B_i$ : Précipitation pour une période de temps donnée, entre deux retournements

#### 4.4.5.2 Lixiviats de la grille centrale

La grille centrale localisée sous les tas de compost permet le captage des eaux de percolation et la mesure directe du volume de lixiviat qui normalement s'écoulerait dans le sol. Elle a une surface de 1,7 m², ce qui représente environ 13 % de la surface occupée par les composts. Par la grille centrale, nous avons récolté de 729 à 1 199 litres (E) de lixiviats alors que libre de compost (G), elle aurait récolté 1 043 L (C5 et C4) ou 1 030 L (C3 et C6) d'eau de pluie.

Pour la durée complète des essais, le plus grand volume de lixiviats provenant de la grille centrale est obtenu avec le compost C6 alors que le plus faible volume est issu du compost statique C5. Le remaniement des brins de paille lors des retournements favoriserait la pénétration dans le tas de l'eau reçue sous forme de précipitations. Pour un fumier de départ de même origine (C4 et C5), on constate que la production de lixiviats par la grille centrale est plus importante pour le compost retourné (842 L) que pour le compost statique C5 (729 L). Il est permis de croire que les retournements ont favorisé la pénétration de l'eau dans le compost C4 en éliminant la présence de paille non décomposée à la surface du compost. Ce phénomène est observé avec le compost statique C5. De plus, les composts pailleux (6,4 kg/u.a.-j) C4 et C5 ont généré moins de lixiviat par la grille centrale que les autres composts.

Les précipitations et les volumes de lixiviats récoltés à la grille centrale en fonction du temps de compostage sont présentés à la figure 4.8. Au cours du premier mois de compostage, l'effet du drainage naturel des tas apparaît clairement alors que le volume cumulatif de lixiviats récolté à la grille centrale ne suit pas la même progression que la précipitation cumulative. On remarque qu'après un mois de compostage, la production de lixiviats suit le même type de progression que la précipitation pour les composts non couverts. Pour cette période de temps, la teneur en eau des composts non couverts est d'environ 80 %. Les composts étant gorgés d'eau, les phénomènes de lixiviation et de précipitation s'équilibrent.

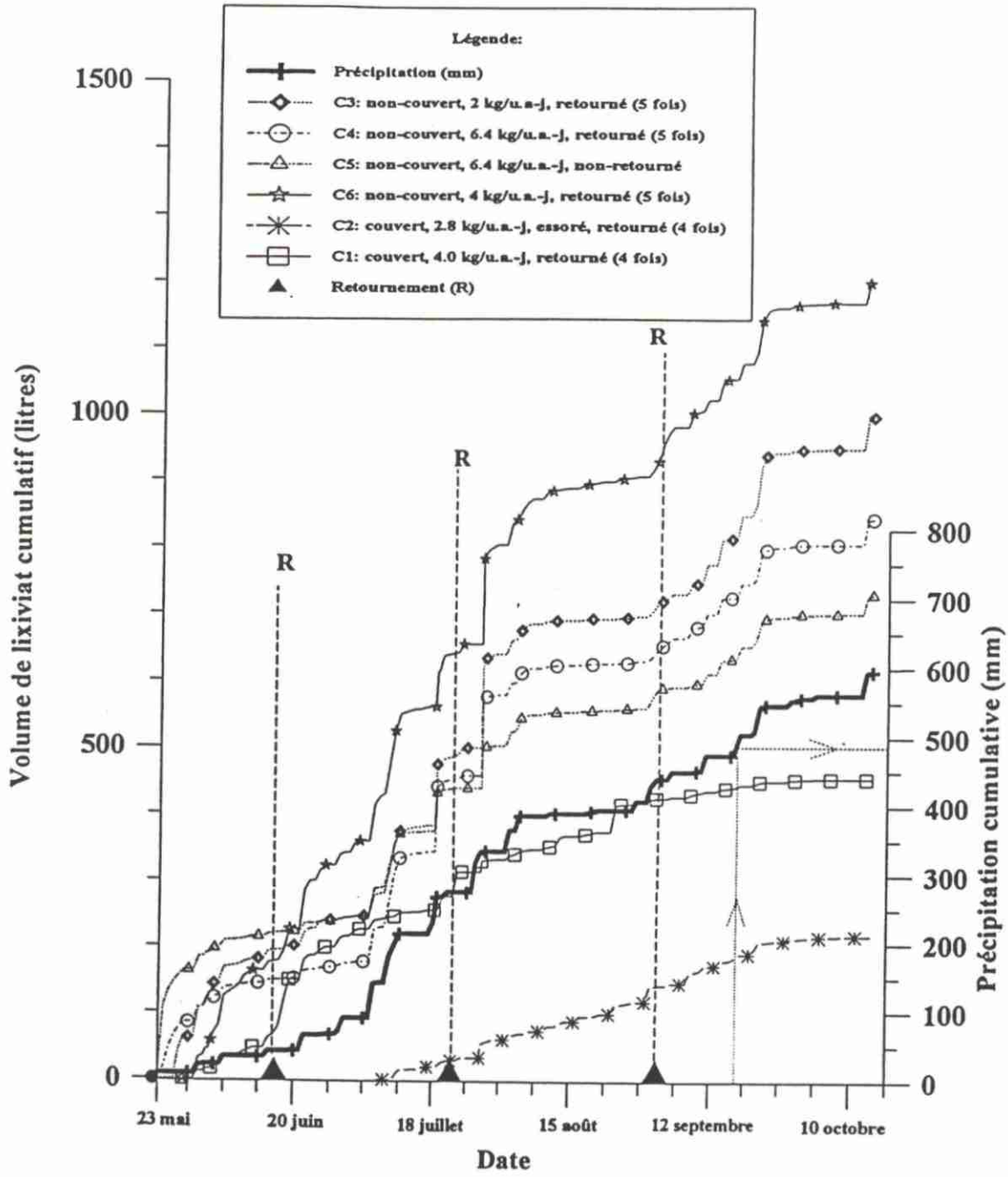



Figure 4.8 : Volume de lixiviats récolté à la grille centrale et précipitation en cours de compostage

#### 4.4.5.2.1 Production totale de lixiviats

Le lixiviat récolté dans les bassins de pourtour est composé de l'eau de pluie tombée directement sur la surface de béton des plate-formes non couvertes et du lixiviat qui s'écoule par le pourtour du tas de compost. L'eau de pluie qui tombe sur le plancher de béton (I) augmente la quantité de lixiviats récolté. Elle doit donc être exclue pour le calcul du volume de lixiviats produit par les composts.

L'aire occupée par chaque tas de compost (A) est estimée par la mesure du périmètre, de la largeur et de la longueur des piles de compost. La surface non couverte par les composts durant les essais de compostage (moyenne de 21,9 $m^2$), représente environ 62 % de la surface totale (35,17 $m^2$) de chaque plate-forme.

En connaissant la surface de béton libre, la surface de béton couverte de compost (A), le volume de lixiviats récolté dans les réservoirs de la grille centrale (E) et celui des grilles de pourtour (D), le volume total de lixiviats généré par chaque tas de compost (J) est calculé. Ces données ont été présentées au tableau 4.23.

#### 4.4.5.2.2 Lixiviation et évaporation

Les phénomènes reliés au mouvement de l'eau qui se déroulent en cours de compostage (volume et caractéristique du lixiviat, évaporation et lixiviation), varient selon la composition initiale du fumier, la quantité et l'intensité des précipitations et l'évolution du compost dans le temps. L'interprétation que l'on fait des données obtenues ne peut faire abstraction du contexte précis de l'expérimentation de l'été 1992.

À l'aide des valeurs du tableau 4.23, les masses d'eau en jeu lors du compostage pour les traitements non couverts sont présentées au tableau 4.24. Ce tableau aide à se représenter l'importance relative des phénomènes de lixiviation et d'évaporation. Cependant, les ratios ne quantifient pas nécessairement des relations de cause à effet. Par exemple, un ratio évaporation/précipitation égale à 100 % ne veut pas dire que c'est uniquement l'eau des précipitations qui est évaporée, dans ce cas il y a eu aussi l'eau contenue dans le fumier au départ qui s'est évaporée.

## TABLEAU 4.24 : MASSE D'EAU CONSIDÉRÉE POUR LE BILAN DES TRAITEMENTS NON-COUVERTS

| Paramètres | Équation | Traitements | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | C3 | C4 | C5 | C6 |
| Volume de lixiviats (L) / Masse de fumier hum. (t.m.) | J / K * 1000 | 442 | 282 | 598 | 578 |
| Masse d'eau évaporée (kg) / Masse de fumier hum. (t.m.) | P / K * 1000 | 995 | 1 309 | 1 148 | 914 |
| Masse eau finale compost (%) / Masse eau initiale fumier | M / L * 100 | 43 | 42 | 60 | 49 |
| Évaporation (%) / Perte d'eau totale | P / O * 100 | 69 | 82 | 66 | 61 |
| Lixiviation (%) / Perte d'eau totale | J / O * 100 | 31 | 18 | 34 | 39 |
| Lixiviation (%) / Précipitation | J / H * 100 | 47 | 26 | 44 | 55 |
| Évaporation (%) / Précipitation | P / H * 100 | 106 | 123 | 85 | 87 |
| Évaporation (%) / Eau initiale | P / L * 100 | 135 | 166 | 149 | 113 |
| Lixiviation (%) / Eau initiale | J / L * 100 | 60 | 36 | 82 | 71 |

Pour la durée complète des essais, le volume de lixiviats récolté des composts non couverts varie de 282 à 598 L/t.m. de fumier. Le plus faible volume de lixiviat est obtenu avec le compost C4 alors que le compost C5 a produit le volume de lixiviat le plus important parmi tous les traitements. Nous avons récolté deux fois plus de lixiviats provenant du compost non retourné que du compost retourné.

Pour l'ensemble des traitements non couverts, la masse d'eau lessivée représente entre 18 et 39 % de l'eau totale perdue.

Pour l'ensemble des traitements, le volume d'eau lessivé est plus faible que le volume reçu sous forme de précipitation. La proportion volumique d'eau lessivée par rapport à l'eau reçue sous forme de précipitation varie de 26 à 55 % selon les traitements. En d'autres termes, la moitié ou moins de l'eau de pluie qui tombe sur le compost se

retrouve sous forme de lixiviats dans l'environnement. Ces valeurs confirment l'importance de l'évaporation en cours de compostage.

Pour l'ensemble des composts non couverts, l'eau perdue par lixiviation représente entre 36 et 82 % de l'eau initialement contenue dans le fumier. Nous ne pouvons établir de lien entre le volume de lixiviats produit en cours de compostage et la teneur en eau initiale du fumier.

Pour l'ensemble des composts non couverts, la masse d'eau évaporée lors du compostage excède (> 100 %) la masse d'eau contenue initialement dans le fumier. Les masses d'eau évaporée pour les traitements non couverts sont donc importantes. Elles varient de 914 à 1 309 kg d'eau/t.m. de fumier. Pour ces traitements, l'évaporation de l'eau représente entre 61 et 82 % de la masse d'eau totale perdue durant les essais.

Le compost C4 affiche la plus forte évaporation; 82 % des pertes sont attribuables à ce phénomène. Seul les traitements C3 et C4 ont évaporé plus d'eau (106 et 123 %) qu'il n'en n'ont reçu sous forme de précipitation. Au contraire, les traitements C5 et C6 ont évaporé moins d'eau que ce qu'ils ont reçu sous forme de précipitation pour respectivement 85 et 87 %. Plus l'évaporation (par rapport aux précipitations) est importante, moins le volume de lixiviats (par tonne de fumier) est considérable.

Les phénomènes de lixiviation sont moins importants que ceux d'évaporation. En général, pour les composts non couverts, il se perd deux fois moins d'eau par lixiviation que par évaporation. Ce phénomène est amplifié pour le compost C4 puisque ce dernier a perdu 4,6 fois plus d'eau par évaporation que par lixiviation. En ce sens, le compostage d'un tel fumier (retourné 3 fois avec 6,4 kg/u.a.-j) apparaît plus intéressant dans l'optique de réduire le phénomène de lixiviation et de réduire l'impact environnemental du compostage au champs.

#### 4.4.5.3 Composts couverts

Les calculs du bilan massique d'eau pour les traitements couverts sont décrits au tableau 4.25. Ces calculs prennent en considération, les masses de fumier, les masses d'eau contenues dans les fumiers et les composts et le volume de lixiviat perdu. Les résultats de ces calculs sont plus précis car on ne tient pas compte des précipitations.

## TABLEAU 4.25 : BILAN MASSIQUE DE L'EAU POUR LES COMPOSTS COUVERTS

| Paramètre | Code | Équation | Traitements | |
|---|---|---|---|---|
| | | | C1 | C2 |
| Volume de lixiviats récolté (L) | J | | 454 | 218 |
| Masse initiale du fumier (kg) | K | | 7 200 | 6 930 |
| Masse d'eau initiale du fumier (kg) | L | | 5 949 | 5 268 |
| Masse d'eau finale du compost (kg) | M | | 1 757 | 2 455 |
| Volume lixiviats (L) / Masse de fumier hum. (t.m.) | | J / K * 1000 | 63 | 31 |
| Masse d'eau perdue totale (kg) | O | (L - M) | 4 557 | 3 413 |
| Perte totale d'eau (%) | | (L - M)/L * 100 | 77 | 60 |
| Lixiviation (%) / Perte d'eau totale | | J / O * 100 | 10 | 7 |
| Masse d'eau évaporée (kg) | P | O - J | 4 103 | 2 925 |
| Masse d'eau évaporée (kg) / Masse fumier humide (t.m.) | | P / K * 1000 | 570 | 422 |
| Évaporation (%) / Perte d'eau totale | | P / O * 100 | 90 | 93 |
| Lixiviation (%) / Masse eau initiale du fumier | | J / L * 100 | 8 | 4 |
| Évaporation (%) / Masse eau initiale du fumier | | P / L * 100 | 69 | 56 |
| Eau biologique produite (kg) par oxydation de la matière organique | Q | voir sect. 4.4.5 | 365 | 330 |

Pour les composts couverts, les pertes totales d'eau s'élèvent à 77 % pour C1 et à 60 % pour C2 (par rapport au contenu initial en eau du compost). Ces pertes d'eau sont attribuables aux phénomènes d'évaporation et de lixiviation. Pour les composts couverts, environ 90 % des pertes totales d'eau sont attribuables à l'évaporation et 10 % à la lixiviation.

Le lixiviat issu du compost C1, dont la TEE initiale du fumier était de 82,6 %, représente 8 % de la masse d'eau contenue initialement dans le fumier. Pour le compost C2 (TEE = 76 %), la masse de lixiviats produit en cours de compostage représente 4 % de la masse d'eau initialement contenue dans le fumier. L'humidité du fumier influence donc la quantité de lixiviats qui sera produit en cours de compostage pour les traitements couverts.

Pour un fumier de départ identique, le volume total de lixiviats récolté est équivalent à 63 litres par tonne de fumier pour le compost C1 alors que pour le compost non couvert C6, ce volume est 9 fois plus élevé, soit l'équivalent de 578 litres par tonne de fumier.

Les composts couverts (C1 et C2) ont produit des lixiviats tout au cours de la période de compostage en quantités moindres que les composts non couverts. À la fin des essais, la production de lixiviats par ces composts cesse pratiquement alors que les TEE sont de 74,6 et 69,2 % pour respectivement C1 et C2. Les volumes cumulatifs de lixiviats récoltés à la grille centrale pour ces traitements sont présentés à la figure 4.8.

Pour les composts couverts après la période initiale (premier mois) d'écoulement des lixiviats, il se produit encore un écoulement de lixiviats au cours des mois suivants. Cet écoulement est dû en partie à la production d'eau par biooxydation de la matière organique et à la perte de la capacité d'absorption en eau du compost.

La masse d'eau évaporée en cours de compostage sera fonction du temps de compostage et de la TEE du compost qui affectera à son tour les températures du compost. La masse d'eau évaporée par les composts C1 et C2 représente respectivement 69 et 56 % de la masse d'eau initiale du fumier. Le compost C1 a perdu plus d'eau par évaporation que le compost C2 bien que sa TEE finale demeure plus élevée (74,6 %) que le compost C2 (69,2 %). Sur une base quotidienne, l'évaporation, par rapport à la masse d'eau initiale du fumier, représente 0,50 %/j pour le compost C1 et 0,57 %/j pour le compost C2.

Il est intéressant de noter que la quantité d'eau biologique produit par l'oxydation de la MO en cours de compostage est à peu près équivalente à la quantité de lixiviat récolté, même si ces deux valeurs n'ont pas de lien direct; il faut aussi tenir compte de l'eau initiale du fumier et de l'eau évaporé.

## 4.4.6 CHARGE DES LIXIVIATS DES COMPOSTS NON-COUVERTS

### 4.4.6.1 Calcul de la charge cumulée des lixiviats

Pour établir un parallèle entre les pertes d'éléments fertilisants du compost et la quantité de ces éléments qui se retrouvent dans le lixiviat, nous avons calculé les charges en azote, phosphore et potassium qui se sont retrouvées dans les lixiviats des composts non-couverts. La charge d'un lixiviat est calculée en multipliant la teneur de l'élément concerné par le volume correspondant et elle représente la masse de l'élément dans le lixiviat :

Charge (g) = Teneur de l'élément (g/L) X Volume (L) (1)

ou encore

Charge en N ou P ou K (g) = [N ou P ou K] (g/L) x V (L) (2)

Par la suite, on calcule la charge cumulée de tous les lixiviats échantillonnés au cours des essais pour chacun des composts. Pour les 4 composts à l'extérieur, nous avons récolté des lixiviats dans les bassins du centre et du pourtour. Pour les mêmes dates, nous avons additionné les charges cumulées des lixiviats du centre et du pourtour pour établir la charge cumulée totale des lixiviats qui se sont écoulés de chacun de ces composts. Aux figures 4.9a, 4.9b et 4.9c, on retrouve l'évolution des charges cumulées totales des lixiviats des 4 composts non-couverts pour respectivement l'azote, le phosphore et le potassium.

Ces figures donnent une idée générale de l'évolution de la charge cumulée. Le but de ces calculs n'était pas d'obtenir des résultats d'une précision élevée mais plutôt d'établir la tendance générale de l'évolution de la charge cumulée en azote, en phosphore et en potassium des lixiviats écoulés des composts.

Le calcul de la charge cumulée dans les lixiviats n'a pas été fait pour les composts couverts, le nombre d'échantillons était trop faible pour obtenir des résultats valables.

#### 4.4.6.2 Évolution des charges perdues dans les lixiviats

Aux premiers examens des figures 4.9a à 4.9c, on remarque que la charge du lixiviat en éléments fertilisants majeurs de tous les composts est plus grande en début qu'en fin d'essais. Pour obtenir 50 % de la charge cumulée globale, et ce pour les trois éléments et les 4 composts à l'étude, il a fallu moins que la moitié de la durée des essais, soit entre 43 et 64 jours.

La charge cumulée des lixiviats des composts C3 et C6 est plus importante que celle des composts C4 et C5 (6,4 kg/u.a.-j). L'évolution des charges cumulées de l'azote, du phosphore et du potassium des composts C3 et C6 (2 et 4 kg/u.a.-j) suit exactement la même tendance. Le compost C6 est celui qui a perdu par les lixiviats le plus de potassium et de phosphore de tous les composts; le fumier utilisé pour ces essais était, au début des essais, le plus humide de tous les fumiers à l'étude. On retrouve par la suite dans l'ordre décroissant les composts C3, C4 et C5. Le compost C5 est celui qui a perdu par les lixiviats le moins de N, P et K de tous les composts.

Globalement les pertes de potassium dans les lixiviats sont plus importantes que les pertes d'azote et de phosphore. Elles sont de 3 à 5 fois plus importantes pour le potassium que pour l'azote. Quant à lui, le phosphore est comparativement perdu en très faible quantité dans les lixiviats par rapport aux autres éléments. Le compost C5 a perdu beaucoup d'azote lors des premiers jours d'essais (environ 35 % au cours des 20 premiers jours); ce phénomène est beaucoup plus grand pour le compost C5 (statique) que pour les autres composts retournés (C3, C4 et C6).

Pour les composts non-couverts (C3 à C6), le calcul de la charge cumulative totale de potassium colle assez bien (légèrement sous estimées) aux pertes calculées par l'approche bilan. Le calcul des pertes d'azote par l'approche bilan ne colle pas au calcul des pertes par la charge en azote du lixiviat et ce, pour tous les composts à l'étude (C3 à C6). Contrairement au phosphore et au potassium pour lesquels on peut vérifier le bilan des pertes par le calcul de la charge cumulée, il n'est pas possible de vérifier pour l'azote le calcul de la charge cumulée par l'approche bilan. En effet, au cours de ces essais, il n'était pas possible de mesurer les pertes d'azote par volatilisation et d'évaluer la fraction d'azote perdue qui se retrouve dans les lixiviats.

L'échantillonnage des lixiviats a été fait seulement les jours suivants d'importantes précipitations; les jours sans pluie, le compost a laissé s'écoulé des lixiviats qui n'ont pas été échantillonnés. Ces lixiviats étaient très certainement plus concentrés que ceux écoulés les jours suivant une précipitation importante. Le calcul des pertes en phosphore et en potassium par la charge cummulée dans le lixiviat est de cette façon sous estimée, puisque que nous avons tenue compte seulement des valeurs mesurées.

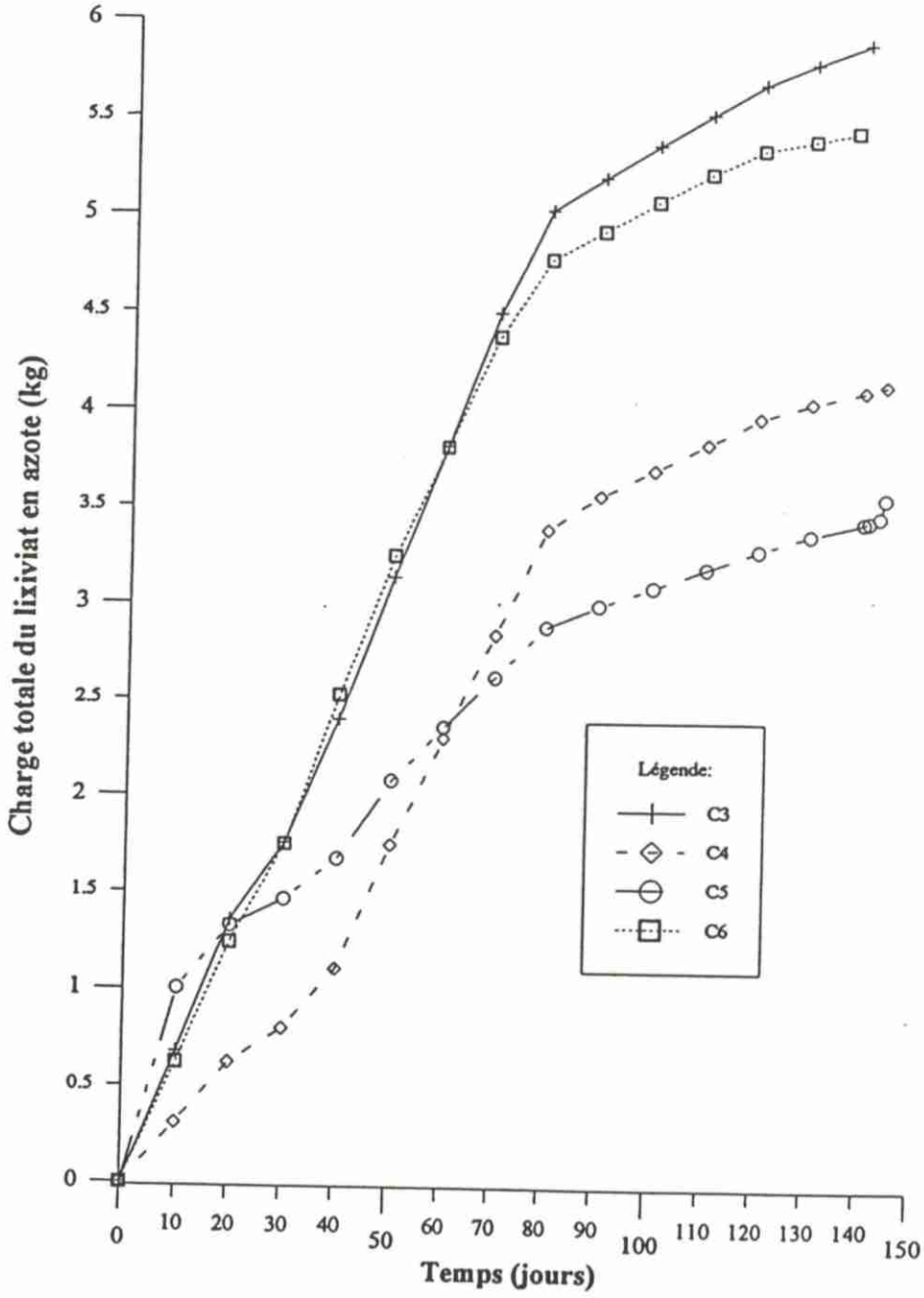



Figure 4.9a : Charge cumulée en azote des lixiviats des composts non-couverts en fonction du temps de compostage

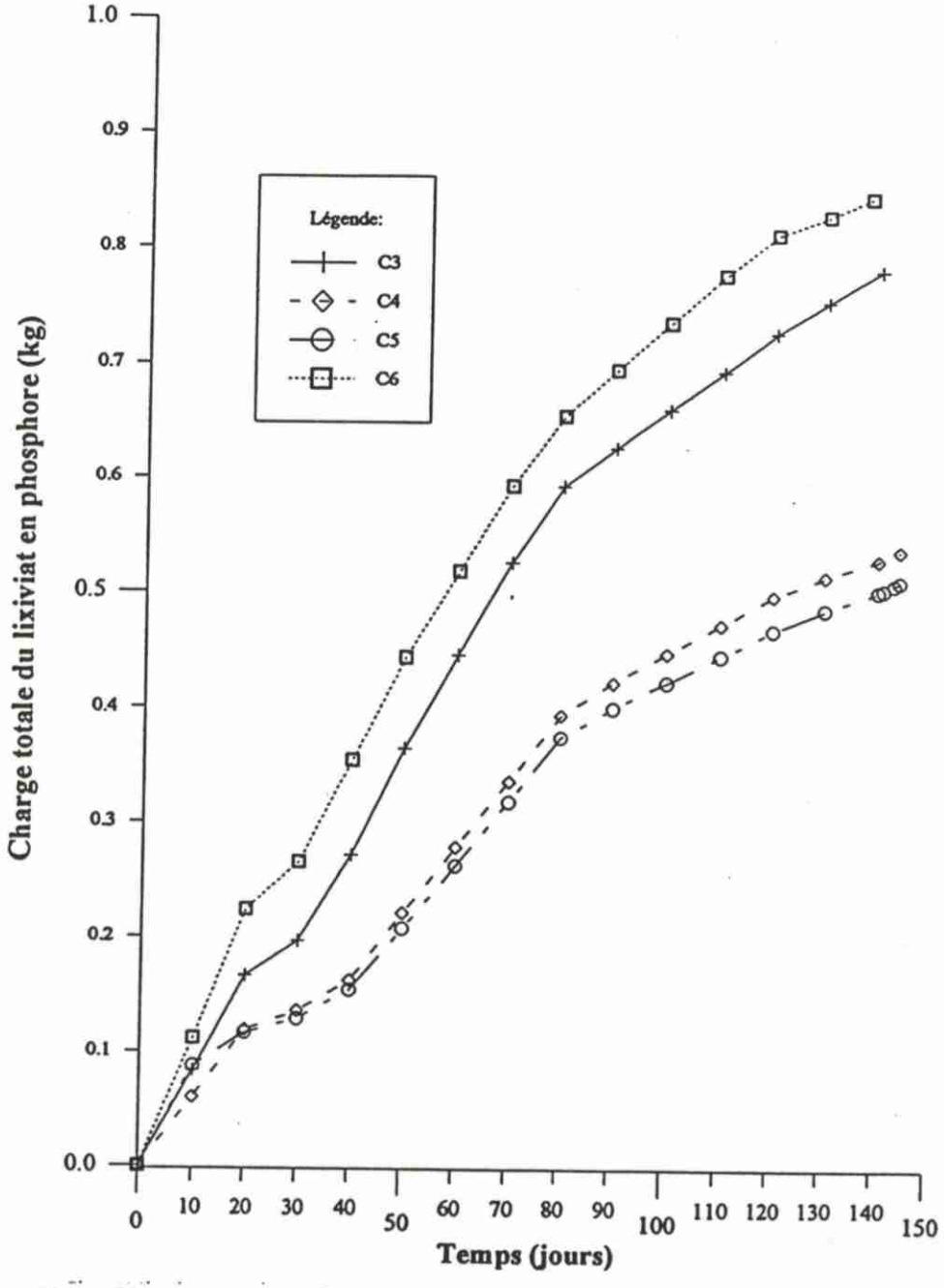



**Figure 4.9b : Charge cumulée en phosphore des lixiviats des composts non-couverts en fonction du temps de compostage**

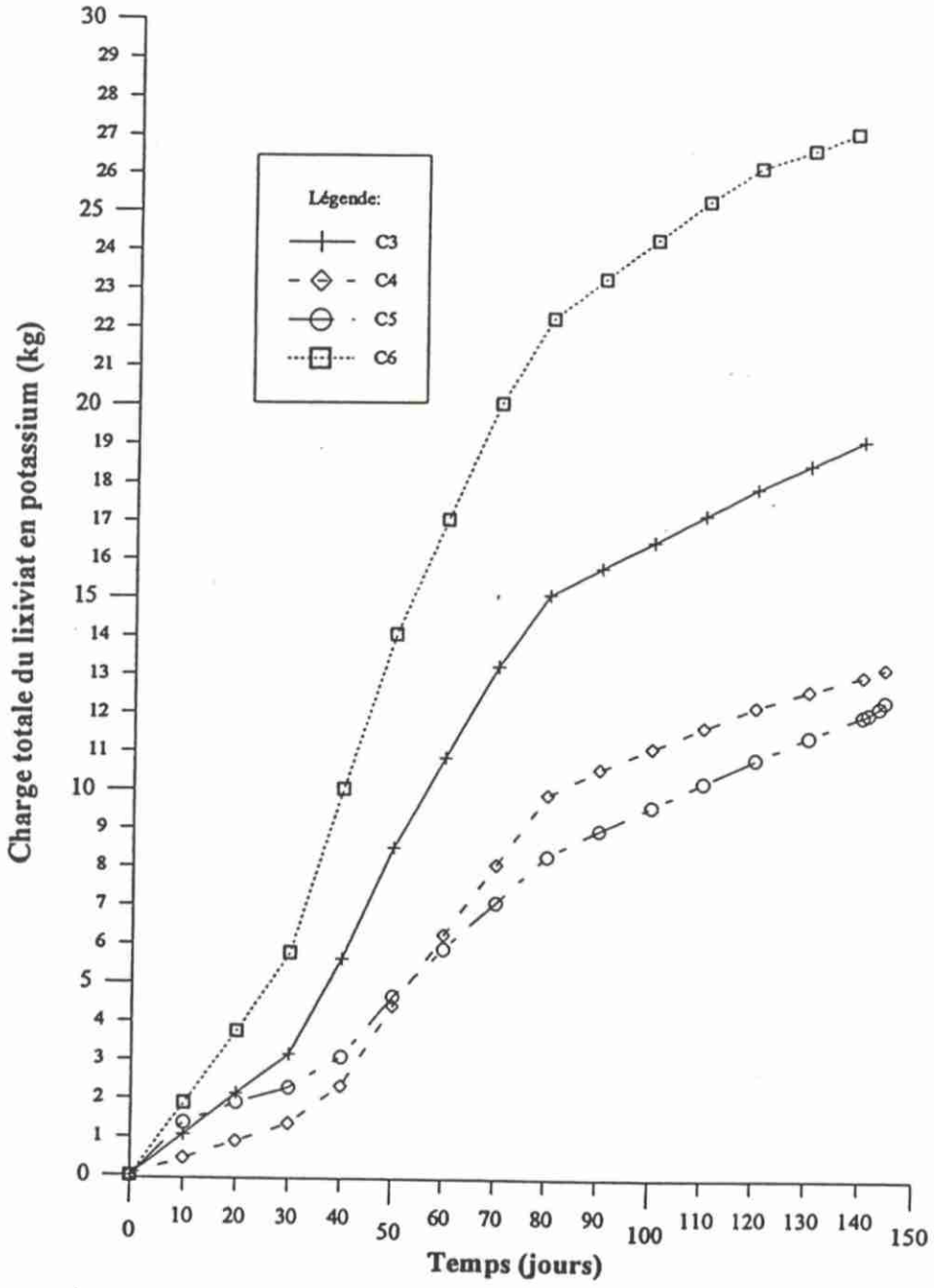



Figure 4.9c : Charge cumulée en potassium des lixiviats des composts non-couverts en fonction du temps de compostage

## 4.4.7 CARACTÉRISTIQUES AGRONOMIQUES DES COMPOSTS

La détermination de la qualité des composts constitue un exercice complexe si l'on prend en considération l'ensemble des paramètres inhérents à la notion de qualité. La comparaison entre les matériaux frais et les matériaux compostés en terme de valeur agronomique est déjà plus facile à établir. Le tableau 4.26 présente certaines caractéristiques agronomiques des fumiers de bovins laitiers frais et compostés. Ces données sont exprimées sur une base humide (kg/tonne de matériel).

### TABLEAU 4.26 : CARACTÉRISTIQUES AGRONOMIQUES DES COMPOSTS

| Paramètre | Fumier (1) | Compost | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
| Teneur en eau b.h. (%) | 78,1 | 74,6 | 69,2 | 78,9 | 79,3 | 79,5 | 82,4 |
| Matière organique b.h. (kg/tonne) | 177,0 | 181,3 | 159,7 | 148,7 | 145,1 | 142,6 | 138,4 |
| Ntotal b.h. (kg/tonne) | 6,57 | 7,36 | 7,09 | 7,15 | 6,96 | 6,31 | 5,97 |
| $N\text{-}NH_4$ b.h. (kg/tonne) | 1,92 | 1,25 | 2,04 | 0,96 | 0,63 | 1,80 | 0,51 |
| $N\text{-}NO_3$ b.h. (kg/tonne) | n.d. | 0,41 | 1,37 | 0,34 | 0,28 | 0,70 | 0,34 |
| Ptot b.h. (kg/tonne) | 1,73 | 3,80 | 5,82 | 3,54 | 3,54 | 2,49 | 2,38 |
| Ktot b.h. (kg/tonne) | 5,35 | 14,3 | 10,43 | 5,40 | 4,38 | 3,49 | 5,40 |
| C/N | 16,2 | 14,3 | 13,1 | 12,1 | 12,1 | 13,1 | 13,4 |
| Taux de respiration (mg $O_2$/kg s.v. - hr) | 2 686 | 532 | 631 | 705 | 449 | 1 372 | 556 |
| pH | 7,7 | 8,9 | 8,3 | 8,3 | 8,4 | 8,4 | 8,4 |

(1) : moyenne des fumiers à l'étude

Une teneur en eau élevée dans les produits est associée à des frais inutiles reliés au transport de l'eau. Les composts non couverts présentent des teneurs en eau similaires à celles du fumier à la ferme. Par contre, le recouvrement des tas de compost en cours de compostage réduit de façon importante la teneur en eau des composts.

Pour chaque tonne de matériel appliquée au sol, les composts apportent en général des quantités moindres de matière organique que le fumier. Cependant, un tel raisonnement ne prend pas en considération les caractéristiques de la matière organique des produits.

La teneur en azote total retrouvée dans les composts est tantôt légèrement inférieure, tantôt supérieure à celle retrouvée dans le fumier. Chaque tonne de compost contient moins de $N\text{-}NH_4$ et plus de $N\text{-}NO_3$ qu'une tonne de fumier.

Pour le phosphore, les composts en contiennent davantage que le fumier. Les résultats obtenus pour le potassium démontrent l'intérêt de couvrir les composts pour en conserver la valeur fertilisante; les composts couverts en contiennent plus du double. Les composts non couverts présentent des teneurs équivalentes de potassium à celles des fumiers frais.

En général, pour un même matériel, le C/N du compost est légèrement inférieur au C/N du fumier non composté. En considérant l'ensemble des fumiers à la ferme, on constate que certains fumiers compostés ont un C/N supérieur à celui du fumier frais. En conséquence, la valeur finale du C/N n'est pas un indicateur approprié pour l'évaluation de la maturité de ce type de compost.

Le taux de respiration constitue un critère d'évaluation de la stabilité du compost. Pour les fumiers frais, il est en moyenne d'environ 2 700 mg $O_2$/kg s.v.-hr alors que celui des composts à l'essai est de 700 mg $O_2$/kg s.v.-hr. Le compost non retourné C5 est le seul compost ayant une valeur finale très élevée. Cette valeur constitue un indice d'une stabilisation moins performante pour le traitement C5.

De façon générale, on considère que le compost est mûr lorsque la valeur du taux de respiration se situe sous les 150 mg $O_2$/kg s.v.-hr (Mathur, 1993). Sur la ferme laitière, on trouve peu d'avantage à amener les composts à un niveau de stabilité aussi élevé que celui recherché pour les composts vendus en sacs. À titre indicatif, ces derniers ont un taux de respiration d'environ 100 mg $O_2$/kg s.v.-hr (CRIQ, 1993). On remarque finalement que le pH des composts à la fin du compostage demeure très élevé.

Le tableau 4.27 présente la valeur monétaire comparative des fumiers de bovins laitiers non compostés et compostés pour l'ensemble des trois éléments fertilisants majeurs exprimés en N-$P_2O_5$-$K_2O$. De façon générale, les fumiers compostés ont une valeur monétaire plus importante que les fumiers non compostés. Toutefois, dans le cas du compost non retourné C5, la valeur monétaire de ce dernier est moindre que celle du fumier avant compostage. Les composts couverts sont ceux qui, à la fin du compostage, ont la valeur monétaire la plus élevée, soit environ 22,80 $/tonne de compost sur base humide. La valeur monétaire des fumiers de bovins laitiers utilisés pour les essais de compostage se situe entre 10,00 et 16,00 $/tonne de fumier sur base humide.

Les pertes monétaires en N-$P_2O_5$-$K_2O$ représentent environ 25 % de la valeur monétaire des fumiers (avant compostage) pour les traitements couverts et environ 50 % pour les traitements non couverts.

**TABLEAU 4.27 : VALEUR MONÉTAIRE DES FUMIERS DE BOVINS LAITIERS NON COMPOSTÉS ET COMPOSTÉS**

| Matériaux | Coût [1] ($ / t.m. sur base humide) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
| Fumier | 10,08 | 16,03 | 13,84 | 12,52 | 14,28 | 10,34 |
| Compost | 22,23 | 23,50 | 16,37 | 15,62 | 12,54 | 13,17 |

1) valeur monétaire fertilisante évaluée selon le coût de chacune des unités N, $P_2O_5$ et $K_2O$ basé sur le coût des engrais chimiques simples.

La valeur monétaire des fumiers et des composts doit être intégrée dans le bilan global de la chaîne de gestion des fumiers. En plus de la valeur monétaire du produit, le bilan doit en outre tenir compte des réductions de masse et de volume ainsi que de l'impact environnemental de chacun des modes de gestion des fumiers.

La valeur monétaire des fumiers et des composts a été calculée pour une ferme moyenne au Québec au tableau 4.28. Ces calculs sont basés sur une production de 474 tonnes de fumier à la reprise (BIOREX, 1989), d'après les pertes de masses obtenues en cours de compostage pour chacun des essais (C1 à C6) et d'après la

valeur monétaire des composts (tableau 4.27). Ce calcul ne considère que la quantité d'éléments fertilisants majeurs (azote, phosphore et potassium) présents dans chacun des deux produits; les caractéristiques de la matière organique du fumier et du compost ne sont pas considérées. Le coût de fabrication, d'utilisation et l'efficacité agronomique ne sont pas comptabilisé.

**TABLEAU 4.28 : VALEUR MONÉTAIRE DES FUMIERS DE BOVINS LAITIERS NON COMPOSTÉS ET COMPOSTÉS POUR UNE FERME MOYENNE**

| Matériaux | Valeur monétaire par ferme [1] ($ / ferme) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
| Fumier | 4 778 | 7 598 | 6 560 | 5 934 | 6 769 | 4 901 |
| Compost | 3 451 | 5 702 | 3 092 | 3 090 | 3 446 | 3 024 |

(1) Pour une production à la ferme de 474 t.m. de fumier, à la reprise.

Pour les six traitements à l'étude, les fumiers valent plus que les composts à cause des pertes d'éléments fertilisants en cours de compostage. D'une part, les fumiers qui ont été couverts (C1 et C2) en cours de compostage valaient environ 1,3 fois plus que les composts produits. D'autre part, les fumiers (C3 à C6) qui n'ont pas été couverts en cours de compostage valaient 1,9 fois plus que les composts produits.

## 4.5 DISCUSSION

Tel que décrit à la section 3.1, les différents traitements ont été choisis pour valider certains scénarios de compostage en andain envisageables à la ferme. Les essais de compostage ont permis de mesurer et de préciser les effets des retournements, du recouvrement et de la quantité de litière utilisée à la ferme sur le compost produit par ces techniques et sur l'impact environnemental, agronomique et économique du compostage.

### 4.5.1 QUANTITÉS DE LITIÈRE DANS LE FUMIER (C3, C4 ET C6)

Trois fumiers dont la quantité de litière utilisée à la ferme était de 2, 4 et 6,4 kg de litière/u.a.-j sont comparés après un temps de compostage sans recouvrement de 140 jours au cours duquel les composts ont été retournés trois fois. Pour des raisons pratiques d'approvisionnement, les fumiers proviennent de fermes différentes. Plusieurs facteurs, autres que la quantité de paille, expliquent la variabilité des caractéristiques initiales des fumiers tels que les caractéristiques du troupeau, le mode et le temps d'entreposage, les précipitations lors de l'entreposage et la localisation dans le tas de fumier de la portion de fumier utilisée pour les essais. En résumé les points suivants ont été retenus suite à ces essais.

- Il n'existe pas de relation linéaire simple établie entre la quantité de litière utilisée sur les fermes laitières à l'étable et la teneur en eau ou le rapport C/N des fumiers frais à la reprise après quelques mois d'entreposage.

- À des quantités de litière variant de 2 à 6,4 kg/u.a.-j, les fumiers reçus sont tous très humides (TEE comprise entre 74 et 83 %) et leur C/N, très bas (entre 12 et 20).

- Les essais ne permettent pas d'établir de lien entre les pertes d'azote en cours de compostage et la quantité de litière utilisée à l'étable.

- Aucune relation directe générale n'est établie entre la quantité de litière utilisée à la ferme et le volume de lixiviats produit lors du compostage. Les pratiques associées à la gestion des fumiers (temps et mode d'entreposage) influencent aussi la teneur en eau du fumier et le volume de lixiviats produit lors du compostage.

- Le plus faible volume de lixiviats récolté lors du compostage est obtenu avec la dose maximale de litière dans le fumier (C4 retourné, 6,4 kg/u.a.-j). Les charges en éléments fertilisants les plus faibles (N, P et K) perdues dans le lixiviat ont aussi été mesurées pour le compost C4.

- Aucun lien n'est établi entre la quantité de litière dans les fumiers et les pertes de volume, de masse humide et sèche, de matière organique, de phosphore ou de potassium.

- Les critères actuels de 4 et 6 kg de litière/u.a.-j n'apparaissent pas suffisants comme seul moyen technique pour assurer l'entreposage et le compostage du fumier sans production de lixiviats.

En résumé l'ajout de paille à l'étable à une quantité de 6,4 kg de paille/u.a.-j ne permet pas de réduire de façon satisfaisante l'impact environnementale des pertes sous forme de lixiviat, même si s'est cette dose de litières qui a donné les meilleurs résultats. L'ajout de litières au fumier a permis de constater une élévation en cours de compostage des températures plus importantes, une plus grande porosité du fumier, une diminution du volume de lixiviats et de la charge du lixiviat en éléments fertilisants. L'ajout de paille au fumier à l'étable permet dans une certaine mesure d'améliorer l'impact à l'environnement du compostage en andains. La quantité de paille ajouté au fumier influence la teneur en eau du fumier mais elle n'en n'est pas le facteur déterminant. D'autres facteur tel que les caractéristiques du troupeau, le mode et le temps d'entreposage, les précipitations lors de l'entreposage et la localisation dans le tas de fumier de la fraction du fumier utilisée, influence plus la teneur en eau du fumier et l'impact du compostage en andain au champ de ce fumier.

### 4.5.2 EFFETS DES RETOURNEMENTS (C4 ET C5)

Un fumier de bovins laitiers composé de 6,4 kg de litière/u.a.-j a été composté pendant 144 jours de deux façons différentes. Le fumier C4 a été retourné trois fois, alors que le fumier C5 n'a pas été retourné lors des essais. Les faits suivants sont remarqués :

- La perte de volume est deux fois plus grande (54 %) pour le compost retourné que pour le compost non retourné (27 %). Principalement à cause d'un plus grand fractionnement des particules de paille en effectuant les retournements.

- Une réduction de masse totale plus importante est observée pour le tas retourné (58 %) que pour le tas statique (42 %). Le retournement du compost favorise l'évaporation de l'eau, l'oxydation de la matière organique et un meilleur compostage.

- La perte de matière organique du compost statique (56 %) est inférieure à celle du compost retourné (65 %).

- Le compost non retourné occasionne des pertes légèrement plus importantes en phosphore et potassium (P= 24 % et K= 59 %) que celles obtenues avec le compost retourné (P=17 % et K= 54 % calculés selon l'approche bilan).

- Les pertes d'azote entre le tas retourné (61 %) et le tas statique (57 %) sont du même ordre de grandeur.

- La teneur en eau finale des deux composts est identique.

- Le compost retourné génère 2 fois moins de lixiviats que le compost non retourné. Par contre la charge totale en N, P et K du lixiviat a été a peu près égale pour les 2 traitements. Le lixiviat du compost C5 (non-retourné) est donc en général moins concentré que celui du compost retourné C4. La réduction de la contamination par les lixiviats n'est pas directement relié au volume de lixiviat.

- Pour le compost retourné, 82 % des pertes d'eau totales sont attribuables à l'évaporation alors que pour le compost non retourné, l'évaporation explique 66 % des pertes totales d'eau.

- À la surface du compost non retourné, on remarque la présence de graminées et de mauvaises herbes à la fin de la période de compostage. Aucune croissance des plantes n'est observée sur les composts retournés.

- Les caractéristiques visuelles de la masse du compost non retourné ne sont pas homogènes à la fin du compostage. On note la présence de trois couches distinctes dans le profil du compost non retourné soit : une couche sèche et peu décomposée d'environ 5 cm à la surface du tas, une seconde couche en arc bien

décomposée d'environ 70 cm et une zone située à la base du tas qui s'apparente visuellement au fumier frais.

- L'intérêt des retournements réside dans l'homogénéisation du matériel qui favorise le déroulement uniforme des processus de compostage et l'obtention d'une qualité uniforme finale du produit. L'oxygénation du compost par retournement est ponctuelle bien que non négligeable.

- Le compost retourné est plus stable que le compost non retourné, même si ces deux composts ont présenté des températures et des teneurs en oxygène similaires au centre de la pile de compost en cours de compostage.

- Cinq des six traitements ont augmenté de valeur en cours de compostage (C1, C2, C3, C4 et C6). Le traitement non retourné C5 est le seul fumier dont la valeur monétaire (en N-$P_2O_5$-$K_2O$) diminue en cours de compostage.

- Globalement à l'échelle de la ferme par rapport à la valeur fertilisante, le fumier vaut plus que le compost et ce pour tous les traitements à l'étude.

### 4.5.3 EFFETS DU RECOUVREMENT (C1 ET C6)

Deux fumiers de formulation initiale identique (fumier de bovins laitiers composé de 4 kg de litière/u.a.-j) ont été compostés pendant 138 jours avec et sans recouvrement.

- La température du compost couvert C1 (temp. max. : 50 °C) est plus élevée que celle du compost non couvert C6 (temp. max. : 45 °C). Elle s'est maintenue au-delà de 45 °C plus longtemps pour le compost couvert.

- La réduction totale de masse est plus importante pour le compost couvert (67 %), que pour celui non couvert (52 %).

- Les pertes en potassium ont été deux fois plus importantes pour le compost non couvert (61 %) que pour le compost couvert (27 %).

- La perte en azote a été plus importante pour le compost couvert (43 %) que celle du compost non couvert (37 %).

- Le compost non couvert a produit 9 fois plus de lixiviats que le compost couvert. Le lixiviat qui s'écoule de la grille centrale du compost couvert est cependant plus concentré que celui du compost non couvert.

- La masse d'eau perdue par évaporation est 41 % plus faible pour le compost couvert que pour le compost non couvert.

- La teneur en eau finale du compost couvert est plus faible (74,6 %) que celle du compost non couvert (82,4 %).

- Tant à l'extérieur que sous abri, les pertes en eau par évaporation sont beaucoup plus importantes que les pertes par lixiviation. Les pertes en eau attribuables à l'évaporation sont de 90 % pour le compost couvert C1 et de 63 % pour le compost non couvert C6, alors que les pertes attribuables à la lixiviation sont respectivement de 10 et 37 %.

De façon générale la couverture des andains de compost permet de réduire la lixiviation, les pertes en P et K et favorise un compostage plus optimale.

### 4.5.4 EFFET DE L'ESSORAGE

Le compostage du fumier non essoré C1 (TEE = 82,6 %) a produit au total l'équivalent de 63 litres de lixiviats par tonne de fumier. Le compost essoré C2 a généré l'équivalent de 31 litres par tonne de fumier essoré pour la période complète de compostage. L'essorage du fumier C2 dont la teneur en eau est passée de 80,2 à 76 %, produirait l'équivalent de 175 litres d'eau par tonne de fumier. Au total, ce mode de gestion (essorage de fumier entreposé + compostage couvert) produirait au minimum l'équivalent de 206 litres de lixiviats par tonne de fumier en ne considérant pas la fraction de solide qui va dans le liquide d'essorage. L'essorage du fumier occasionne donc l'entreposage temporaire ou permanent d'une quantité de purin supplémentaire. L'essorage et le compostage comme mode de gestion des fumiers de bovins laitiers seront vus plus en détail au chapitre 6.

## 4.6 CONCLUSION

Les caractéristiques du fumier de bovins tel qu'on le retrouve sur les fermes laitières québécoises sont variables. Pour des opérations de compostage, les fumiers de bovins sont très humides et leur rapport C/N faible; au départ ces deux paramètres ne respectent pas les critères de compostage. En conséquence, la production de lixiviats et la perte d'azote par volatilisation apparaissent inévitables. Certains correctifs apportés à la composition du fumier jumelés à une bonne gestion de ce dernier par compostage pourraient diminuer l'ampleur de ces problèmes.

L'emploi d'une quantité massive de paille à raison de 6,4 kg/u.a.-j n'a pas permis d'atteindre des valeurs de rapport C/N du fumier en début de compostage supérieures à 14. Le rapport C/N le plus élevé en début de compostage a été obtenu avec une utilisation à la ferme de 4 kg de litière/u.a.-j (C/N=19,8). Ceci illustre bien l'inexistence d'une relation linéaire directe entre la quantité de litière utilisée à la ferme et le rapport C/N du fumier à composter. Le même type de raisonnement s'applique pour la teneur en eau du fumier. Le mode de gestion du fumier à l'évacuation et à l'entreposage influence davantage ces deux derniers paramètres.

Pour tous les composts à l'essai, les températures ont été égales ou supérieures à 45 °C. La quantité de litière utilisée à la ferme dans des proportions variant entre 2 et 6,4 kg/u.a.-j autorise un déroulement convenable des processus de compostage. Les porosités des fumiers les plus élevées induisent les plus fortes élévations de température. En regard des processus de compostage, il apparaît souhaitable d'avoir une porosité effective du fumier supérieure à 60 %. Ces valeurs de porosité sont obtenues lorsque la teneur en eau des fumiers (avec paille non hachée) est inférieure à 80 %.

Pour l'ensemble des fumiers compostés, les pertes de masse se situent entre 42 et 67 % et les pertes de volume entre 27 et 57 % et ce pour 140 jours de compostage; la plus faible perte a été obtenue avec le compost non retourné.

Pour les composts non couverts, les pertes en azote totales varient de 37 à 64 %, celles en phosphore de 12 à 24 % et celles en potassium de 54 à 61 %. Le compostage sous abri a permis de réduire de façon importante les pertes en phosphore (inférieures à 5 %) et en potassium (inférieures à 27 %) alors que les pertes en azote ont été légèrement inférieures comparativement aux composts non couverts.

Il apparaît donc que les pertes en azote lors du compostage s'expliquent davantage par les phénomènes de volatilisation que par le lessivage.

En dépit des pertes encourues en cours de compostage, les composts ont une valeur monétaire, basée sur la valeur en N-$P_2O_5$-$K_2O$, généralement plus élevée que celle des fumiers non compostés. La valeur monétaire des fumiers varie de 10,00 à 16,00 $/t.m. sur base humide. Elle se situe entre 12,50 et 16,40 $/t.m. pour les composts non couverts et à environ 22,90 $/t.m. pour les composts couverts. Les pertes d'éléments fertilisants en cours de compostage représenteraient 50 % de la valeur initiale du fumier pour les composts non couverts et 25 % pour les composts couverts.

La charge polluante des lixiviats générés lors du compostage est suffisamment importante pour créer des impacts négatifs à l'environnement s'ils se retrouvent dans le cours d'eau. La DCO moyenne des lixiviats générés au cours des premiers jours du compostage a été de 58 174 mg $O_2$/L. Les lixiviats produits tout au cours du compostage provenant des composts couverts avaient une DCO moyenne de 30 118 mg $O_2$/L; celle des liquides provenant des composts non couverts a été de 20 775 mg $O_2$/L. On remarque une baisse de la teneur en éléments polluants des lixiviats en cours de compostage notamment pour la DCO et la $DBO_5$, les coliformes totaux et fécaux, les MES, les teneurs en azote et en phosphore. La teneur en potassium et la conductivité électrique des lixiviats sont demeurées élevées tout au cours des essais. La charge en éléments fertilisants est quant à elle, plus importante en début de compostage qu'à la fin.

Tous les composts à l'étude, incluant les traitements couverts, ont généré des lixiviats au cours du compostage. L'utilisation de litière à raison de 2, 4 et 6,4 kg/u.a.-j à la ferme n'a pas permis d'atteindre des niveaux d'humidité suffisamment bas pour éviter la production de lixiviats. Aucune relation directe entre la quantité de litière utilisée à la ferme et le volume de lixiviats produit lors du compostage n'est établie.

Le recouvrement du compost a permis de réduire de façon importante le volume de lixiviats produit en cours de compostage. Les essais permettent de croire que le compostage d'un fumier, dont la teneur en eau b.h. initiale serait inférieure à 70 % avec recouvrement du compost, constituerait une pratique acceptable pour l'environnement mais qui n'a pas été démontré économiquement. L'intérêt de couvrir les composts en cours de compostage réside, en plus d'une diminution des lixiviats, en une perte de masse totale plus importante.

Pour les composts retournés trois fois et pour un temps de compostage de 140 jours, la perte volumique est de 52 % et la perte massique totale s'établie à 59 %. L'absence de retournement s'est traduit par l'obtention d'un matériel hétérogène couvert en surface de végétation et par une production de lixiviats deux fois plus importante. Par contre, globalement la charge totale en éléments fertilisants (N, P et K) retrouvés dans les lixiviats est sensiblement la même pour les composts retournés et le compost statique. Le lixiviat du compost statique proviendrait davantage du ruissellement de l'eau de pluie en surface du tas.

Les essais de compostage sous couverts permettent de croire que le recouvrement des andains de compost à la ferme est une avenue à privilégier. L'utilisation de toiles adaptées au compostage et aux conditions climatiques québécoises doit techniquement et économiquement être évaluée.

De façon générale, l'optimisation des processus de compostage passe par une diminution de la teneur en eau, par le retournement du compost (un minimum de 2 à 3 fois) et par la protection du compost contre les précipitations en couvrant l'andain d'une toile ou d'une toiture.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASAE STANDARDS (1989), D384.1. Manure production and characteristics. 659 p.

BIOREX (1989). Le compostage du fumier à la ferme, étude de faisabilité technico-économique et évaluation des impacts agronomiques et environnementaux : rapport final. Québec : Ministère de l'Environnement, 275 p.

BIOREX, (1994). Bilan massique de deux régies du fumier incluant le compostage sur la ferme laitière québécoise : rapport final version préliminaire pour Québec : Ministère de l'Environnement et de la faune, 147 p.

Besson, J.M., Vogtmann, H. (1982). European Composting Methods : Treatment and Use of Farm Yard Manure and Slurry, in Composting Theory and Practice for City, Industry and Farm. p. 248 à 258

CRIQ (1993). Évaluation de la maturité des composts par respirométrie : recherche interne non publié.

Environnement Canada (1992). Données météorologiques à l'aéroport international Jean Lesage pour les mois de mai à octobre 1992.

Gagnon, M et Elustondo, J., BIOREX (1992). Bilan massique de deux régies du fumier incluant le compostage sur la ferme laitière québécoise. Ministère de l'environnement du Québec : Symposium sur la recherche et le développement en gestion environnementale des effluents d'élevage au Québec, 9 et 10 septembre 1992, textes de conférences. p. 39 à 54.

Jobin, P. (1992). Évaluation de différents systèmes de compostage à la ferme : document provisoire. Centre de développement d'agrobiologie du Québec. 36 p.

Mustin, M. (1987). Le compost, gestion de la matière organique. Éditions François Dubuc, Paris. 954 p.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES (suite)

Mathur, S.P. (1993). Document de discussion du CCME sur la réglementation en matière de maturité du compost, non-publié. 15 p.

Ott, P.R. (1990). The Composting of Farmyard Manure with Mineral Additives and Under Forced Aeration, and the Utilization of Fym and Fym Compost in Crop Production. Thèse de doctorat : Université des Landes Hessen. 275 p.

# CHAPITRE 5 : COMPOSTAGE DES FUMIERS DE BOVINS LAITIERS À LA FERME

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

## 5.1 INTRODUCTION

Plusieurs projets de recherche et de démonstration portant sur le compostage du fumier de bovins laitiers à la ferme ont été réalisés au Québec entre 1990 et 1993. Il devenait donc intéressant de capitaliser sur les projets existants pour effectuer un suivi du compostage des fumiers réalisé dans des conditions pratiques à la ferme. Les données recueillies par ce suivi peuvent être comparées avec celles obtenues des autres essais de compostage réalisés sur la plate-forme expérimentale de compostage et présentés au chapitre 4 du présent rapport.

Le suivi effectué sur les fermes laitières porte notamment sur les aspects environnementaux du compostage à la ferme: quantité de litière, production de lixiviats, recouvrement des andains, caractérisation des sols sous les andains de compost. Les effets de l'utilisation des composts sur la croissance des végétaux et sur les propriétés des sols amendés n'ont pas été investigués.

Le chapitre 5 présente les résultats du suivi effectué sur les sites de compostage suivants : quatre fermes laitières, une ferme expérimentale avec bovins laitiers, une ferme d'élevage de bovins de boucherie et le site de compostage en andain au CRIQ.

Dans le cas des fermes A, B, C et IT, un suivi ponctuel a été effectué lors des visites. De plus, la récolte des lixiviats a été réalisée par les personnes responsables désignées pour chacune de ces fermes.

Pour les fermes E et RA et au site de compostage du CRIQ, un suivi plus rigoureux des essais a été réalisé compte tenu de la proximité des emplacements.

## 5.2 OBJECTIFS

- Réaliser le suivi du compostage du fumier en andain à la ferme.
- Comparer les données obtenues à la ferme avec celles obtenues des essais sur la plate-forme expérimentale du CRIQ par l'analyse notamment des caractéristiques des fumiers, des composts et des lixiviats.

Plus spécifiquement et selon les essais, le suivi effectué sur les fermes visait à :

- Quantifier et analyser les lixiviats recueillis à la base des andains.
- Évaluer diverses techniques visant à optimiser d'un point de vue environnemental, le compostage des fumiers à la ferme.
- Déterminer les effets du recouvrement des andains à l'aide de différents matériaux et de l'application d'absorbants sous les andains de compost sur la production de lixiviats.
- Comparer diverses techniques de retournement des andains (bras mécanique et retourneur d'andain).
- Caractériser les sols situés sous les andains de compost avant et après la période de compostage.

## 5.3 MÉTHODOLOGIE

Au total, 7 sites de compostage ont fait l'objet d'un suivi en 1991 et 1992. L'information sur la nature du suivi analytique, le mode de gestion des fumiers et la nature des opérations de compostage pour chacun des sites est présentée au tableau 5.1.

L'échantillonnage des fumiers et des composts a été effectué par le personnel du CRIQ. Le prélèvement des échantillons de fumier ou de compost est réalisé en pratiquant, à l'aide d'une fourche, une coupe dans l'andain et en prélevant environ 5 sous-échantillons de 4 L dans l'ensemble de la masse (haut, milieu, bas, côté gauche et côté droit de l'andain). Le volume total de l'échantillon destiné aux analyses est de 20 L. Les échantillons de composts sont conservés à une température de 4 °C avant d'être analysés.

Des échantillons de sols sous l'andain et dans le champ avoisinant l'andain (témoin) ont été prélevés lors des visites par le personnel du CRIQ. L'échantillon de sol, d'un volume total de 500 mL, est constitué de 10 sous-échantillons de sol. Les analyses de sols ont été effectuées par le laboratoire d'analyses des sols de l'Université Laval.

Le prélèvement des lixiviats a été effectué par le personnel en place pour les fermes B, C, IT et E. L'accumulation journalière de lixiviats issus des lysimètres sous les andains permettait de combler les contenants pour l'obtention d'un volume total de 1 L nécessaire aux analyses des lixiviats. Entre les prélèvements, les échantillons de lixiviats ont été conservés au frais à chacune des fermes. Une fois le volume obtenu, l'échantillon a été expédié au CRIQ.

Les méthodes d'analyses des fumiers, des composts et des lixiviats utilisées sont identiques à celles décrites à la section 4.3.6.

Les lysimètres installés sur les fermes sont présentés à la figure 5.1. Les lysimètres de la ferme IT, B et C sont recouverts avec le sol agricole déplacé pour l'installation du lysimètre. Les lixiviats de la ferme B ont été récoltés dans des lysimètres de sol, prélevé au champ. De plus, pour être le plus réaliste possible le gazon en place à la ferme B a été remis sur la surface du lysimètre. Le sol du lysimètre de la ferme IT est constitué, quant à lui, d'un matériel argileux d'une grande cohésion. À la ferme E et au CRIQ, le sol agricole des lysimètres a été substitué par du sable pour limiter les risques de colmatage. À la ferme RA, un système complet de captage des liquides

a été installé sur chacune des plates-formes satellites. La figure 5.3 présente le système de récolte des lixiviats implanté à la ferme RA; ce système est décrit plus en détail à la section 5.3.1.7.

# TABLEAU 5.1 : DESCRIPTION DES SITES DE COMPOSTAGE

| | Site de compostage | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | IT | RA | E | CRIQ |
| **SUIVI ANALYTIQUE** | | | | | | | |
| Fumier | X | X | X | | X | X | X |
| Compost | X | X | X | X | X | X | X |
| Lixiviat | | X | X | X | | X | X |
| Sol | X | X | X | | | | X |
| Température et $O_2$ | X | X | X | X | X | X | X |
| **GESTION DES FUMIERS** | | | | | | | |
| Nombre d'animaux | 55-60 | 38-40 | 44 | | 44 | 20 | 44 |
| **Litière** | | | | | | | |
| Paille | X | X | X | X | X | X | X |
| Tourbe | X | | | | | | |
| Ripe de pin | | | X | X | | X | |
| **Entreposage du fumier** | | | | | | | |
| Sur le sol | X | | | | | | |
| Sur plancher de béton | | X | X | X | X | X | X |
| Entreposage couvert | | X | X | X | X | X | X |
| Entreposage non couvert | X | | | | | | |
| Montée écureur | X | | X | X | | | |
| Évacuateur souterrain | | X | | | X | | X |
| **COMPOSTAGE** | | | | | | | |
| Retournement [1] | W | W | S | S & W | BM | S | S |
| Période de compostage [2] | A91 | A91 | A91 | A91 | EA92 | E92 | EA92 |

1) Retournement des andains :
W = Wildcat, S = Sittler, BM = Bras mécanique.

2) Période de compostage :
A91 = automne 1991, E92 = été 1992, EA92 = été + automne 1992.

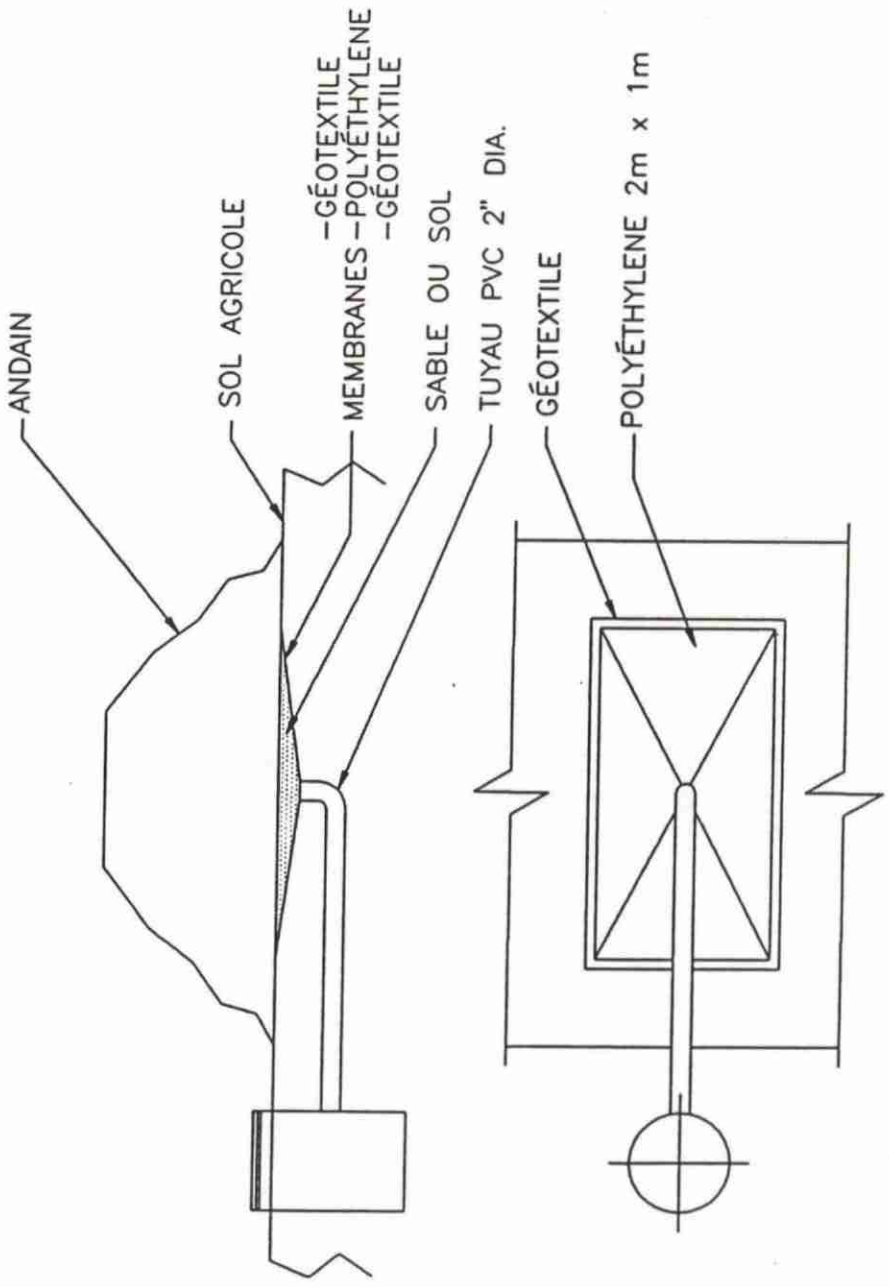



**Figure 5.1 : Lysimètre installé à la ferme sous les andains de compost**

## 5.3.1 DESCRIPTION DES SITES DE COMPOSTAGE

### 5.3.1.1 Ferme A

La ferme A est une entreprise laitière dont le fumier est produit par l'équivalent d'environ 60 u.a. Il est évacué à l'aide d'une montée d'écureur et entreposé sur le sol directement sous la montée d'écureur. Le fumier entreposé est soumis aux conditions climatiques extérieures. La litière utilisée est composée de 4 kg de paille d'orge hachée et d'environ 2 kg de tourbe de mousse de sphaigne pour un total de 6 kg de litière par u.a.-j.

Le compostage du fumier se fait en andains au champ et le compost est retourné à l'aide d'un retourneur d'andain de marque Wildcat. La mise en andain du fumier se fait à l'aide d'un camion à benne basculante.

Au cours des visites à la ferme A, différents échantillons ont été prélevés pour fins d'analyses. Ces échantillons comprennent : du fumier entreposé sous la montée d'écureur, des lixiviats générés à la base du tas de fumier, des composts en andains pour des durées de compostage et des formulations variables, du sol témoin et du sol sous andains de compost après divers temps de compostage. De plus, des mesures de températures et de teneurs en oxygène des composts ont été effectuées lors de ces visites.

### 5.3.1.2 Ferme B

On retrouve à la ferme B un troupeau laitier d'environ 50 u.a. (38 à 40 vaches). La quantité de paille (orge et avoine) utilisée à l'étable varie entre 3 et 3,5 kg/u.a.-j. De plus, on ajoute de 0,5 à 1 kg/u.a.-j de paille sur le plancher de l'entrepôt à fumier ou à l'andain au champ pour une quantité de litière totale d'environ 4 kg/u.a.-j. Le fumier est évacué de l'étable vers l'entrepôt à fumier couvert à l'aide d'un évacuateur souterrain.

Le compostage du fumier est pratiqué par la méthode des andains qui sont retournés mécaniquement à l'aide d'un retourneur de marque Wildcat. Au cours du suivi de l'année 1992, une section de l'andain a été couverte à l'aide d'une toile imperméable (film de polyéthylène noir) et ce, à partir du 19 octobre. L'autre section de l'andain n'a pas été couverte. Un lysimètre de 1 m x 1,5 m a été installé sous chacune des deux

sections de l'andain déjà en place depuis quelques semaines. Le matériel du lysimètre était constitué du sol et du gazon déjà en place.

Des analyses de fumier frais, de composts, de lixiviats et de sols ont été réalisées sur les matériaux prélevés lors des visites. Les lixiviats ont été recueillis régulièrement par le personnel de la ferme et expédiés rapidement au laboratoire du CRIQ.

#### 5.3.1.3 Ferme C

Le fumier produit par le troupeau laitier de 44 u.a. est évacué quotidiennement de l'étable à l'aide d'une chaîne d'écureur. Il est entreposé temporairement dans un camion à benne basculante avant d'être rapidement transporté au champ (à tous les un où deux jours) et déposé directement sur le sol pour former l'andain de compost.

Des quantités de litière variant de 4 à 7 kg/u.a.-j sont utilisées à l'étable. La litière est composée de paille (4 à 5 kg/u.a.-j), de sciure de bois (1 à 2 kg/u.a.-j), de vieux foin (0 à 1 kg/u.a.-j). On y ajoute du phosphate de roche à raison de 0,5 kg/u.a.-j.

La technique de compostage utilisée consiste à composter le fumier de bovins laitiers en andain et ce, tout au cours de l'année sur un site spécialement aménagé à cette fin. Ainsi, le temps d'entreposage est réduit au minimum. Les andains sont retournés avec un retourneur de marque Sittler.

Deux lysimètres de 1 m x 2 m ont été installés pour recueillir les lixiviats. Ils ont été recueillis par le personnel du bureau local du MAPAQ et expédiés au laboratoire du CRIQ. Deux échantillons de composts et un de fumier frais ont été prélevés à la ferme lors des visites et analysés au laboratoire du CRIQ. Finalement, des échantillons de sol témoin et du sol situé sous les andains ont été prélevés et caractérisés.

#### 5.3.1.4 Ferme expérimentale de l'ITA de La Pocatière (IT)

Le fumier de la ferme IT est composé de paille, de copeaux d'élagage et de sciure dans diverses proportions. Une quantité d'environ 5 kg/u.a.-j de litière est utilisée à l'étable. Le fumier est entreposé dans un abri sur une plate-forme égouttante. La fraction solide du fumier est mise en andain sur un site expérimental de compostage aménagé à cette fin.

Les retourneurs d'andains de marque Sittler et Wildcat ont été utilisés pour brasser et aérer le compost.

À la ferme IT, des échantillons de composts et de lixiviats ont été prélevés lors des visites. Des lysimètres de 1 m x 2 m ont été installés sous les andains pour la collecte des lixiviats. Le sol du lysimètre était argileux et très cohésif. Le personnel de l'ITA était responsable de la collecte des lixiviats. Des mesures de températures et de teneurs en oxygène de divers composts ont été prises par le personnel du CRIQ lors des visites.

### 5.3.1.5 Ferme E

Le fumier de bovins de **boucherie** de la ferme E est produit tout au cours de l'hiver par les animaux. Durant cette période, le fumier s'accumule sur le plancher de béton de l'étable et il est soumis au piétinement régulier des animaux. La circulation des animaux sur le fumier facilite l'homogénéisation et favorise le contact des déjections et de la litière. Une quantité de litière correspondant à 5,7 kg/u.a.-j est ajoutée à l'étable. La litière utilisée est composée de résidus d'émondage des arbres (1,8 kg/u.a.-j) et de vieux foin (3,9 kg/u.a.-j). Une quantité de 1,3 kg/u.a.-j de phosphate de roche est également ajoutée au fumier.

Les essais réalisés à la ferme E consistent à déterminer les effets sur l'environnement et sur la qualité du compost de deux solutions alternatives pour le compostage du fumier : le recouvrement des andains et l'ajout de matériaux absorbants sur le sol à la base de l'andain.

Le dispositif expérimental implanté à la ferme E est illustré à la figure 5.2. Ce dernier permet de recueillir les lixiviats qui s'écoulent dans le sol, d'en mesurer le volume et de les caractériser. L'unique andain de compost, dont la composition est identique et uniforme, comprend 6 sections de 6 m x 3 m chacune, qui diffèrent selon les diverses alternatives utilisées. Un lysimètre est installé au centre de chacune d'elles. Les lysimètres ont une superficie de 2 $m^2$ (1 m x 2 m). Un volume total de 1 L de lixiviat est utilisé pour l'analyse de chaque échantillon. Le volume de lixiviats issu de chacun des 6 lysimètres est mesuré quotidiennement et ajouté au volume récolté les jours précédents jusqu'à l'obtention d'un volume total de 1 L. L'échantillon est par la suite acheminé rapidement au laboratoire du CRIQ.

Trois matériaux absorbants différents ont été disposés sur le sol de trois sections d'andain distinctes. La paille d'orge non-hachée, la sciure de bois et la tourbe de

mousse de sphaigne brune ont été utilisées respectivement aux sections A, B et C. La quantité d'absorbant appliquée a été calculée pour permettre l'absorption de 5 L de lixiviat par $m^2$ de lysimètre pour la période d'essai. Ce volume de lixiviat correspondait au volume moyen récolté à l'automne 1991 sur les fermes B, C et IT. Les caractéristiques des absorbants décrits au chapitre 2 ont également servies pour ce calcul. Un facteur de sécurité de 2 a été appliqué à ces quantités pour tenir compte de la pression exercée sur le matériel et de la répartition plus ou moins uniforme du matériel absorbant sur la surface de sol. Un lit absorbant de 15,2 cm de paille à la section A, de 2,54 cm de sciure de bois à la section B et de 2,54 cm de tourbe brune à la section C a été appliqué sur le sol juste avant la mise en andain du fumier.

À sa sortie de l'étable au printemps, le fumier est transporté au champ et la confection de l'andain est réalisée en une seule étape à l'aide de la benne basculante.

Le retournement de l'andain est fait avec un retourneur de marque Sittler. Une attention particulière a été apportée lors des retournements afin de contrôler la hauteur du rouleau mécanique de façon à ne pas incorporer la couche de matériel absorbant au compost.

À la section D, le compost est recouvert en permanence d'une toile géotextile semi-perméable fabriquée par Texel Inc. (Compostex 200). Une toile imperméable (film de polyéthylène noir) a été utilisée pour couvrir en permanence le compost de la section E. Des pneus disposés à la base de l'andain retiennent les deux toiles. Lors des retournements, les toiles sont retirées. Le traitement témoin se retrouve à la section F (sans recouvrement et sans matériel absorbant à la base de l'andain). Les composts des sections D à F ont été échantillonnés au centre de chacune des sections juste avant les retournements en creusant dans l'andain. Les échantillons de compost ont été pris à diverses hauteurs dans le profil de l'andain pour obtenir un volume total de 20 L par échantillon.

#### 5.3.1.6 Ferme Rolland Allard, St-Nicolas (RA) et site expérimental de compostage du CRIQ, Sainte-Foy

Le système de gestion des fumiers (évacuation-entreposage et reprise) utilisé à la ferme RA a été conçu et implanté par "Les consultants BPR Inc." de Québec. L'objectif des Consultants BPR inc. dans ce projet, était de concevoir un système novateur d'entreposage des fumiers.

Le CRIQ a bénéficié des installations de compostage pour effectuer un suivi concernant exclusivement le compostage du fumier. Celui-ci est entreposé dans un abri à fumier et composté sur les plates-formes satellites (voir figure 5.3).

Les essais réalisés à la fois sur la ferme RA et sur le site du CRIQ avaient pour objectif de comparer deux techniques de compostage d'un fumier de même origine : le compostage sur plate-forme satellite avec retournements à l'aide d'un bras mécanique et le compostage en andain avec retournements à l'aide d'un retourneur d'andain de marque Sittler.

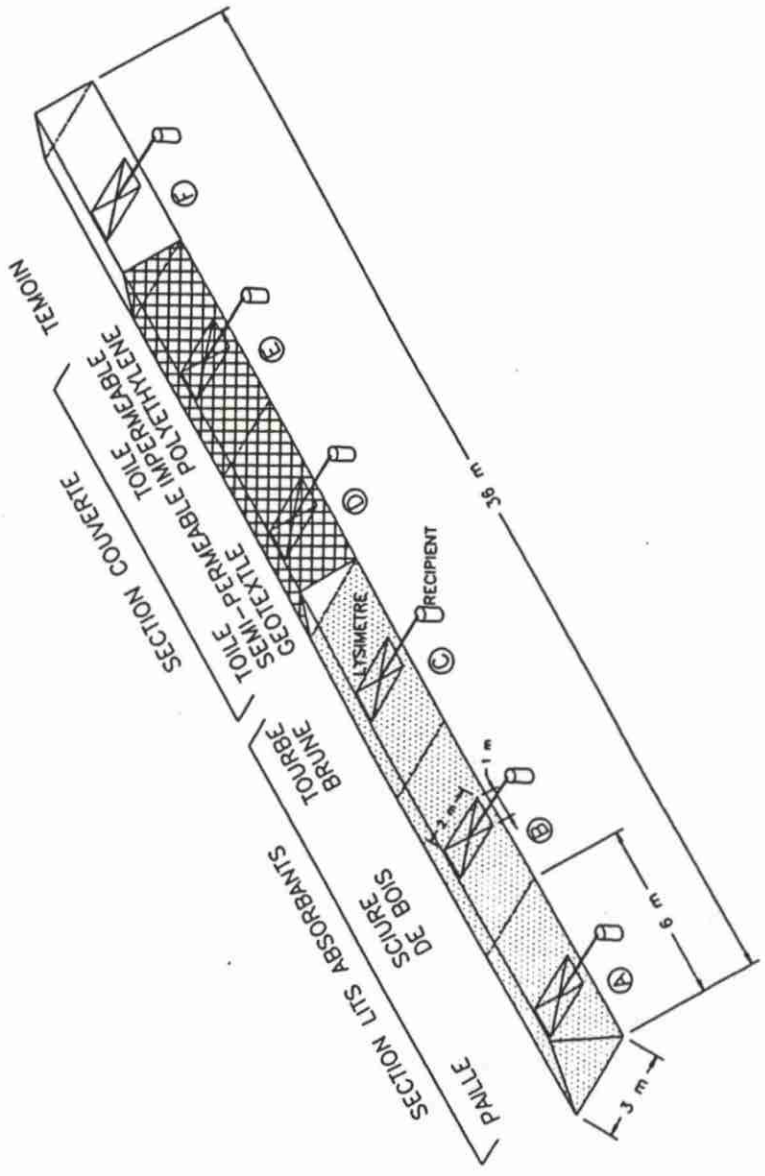



**Figure 5.2 :** **Essais de compostage avec des lits absorbants et des toiles de recouvrement à la ferme E**

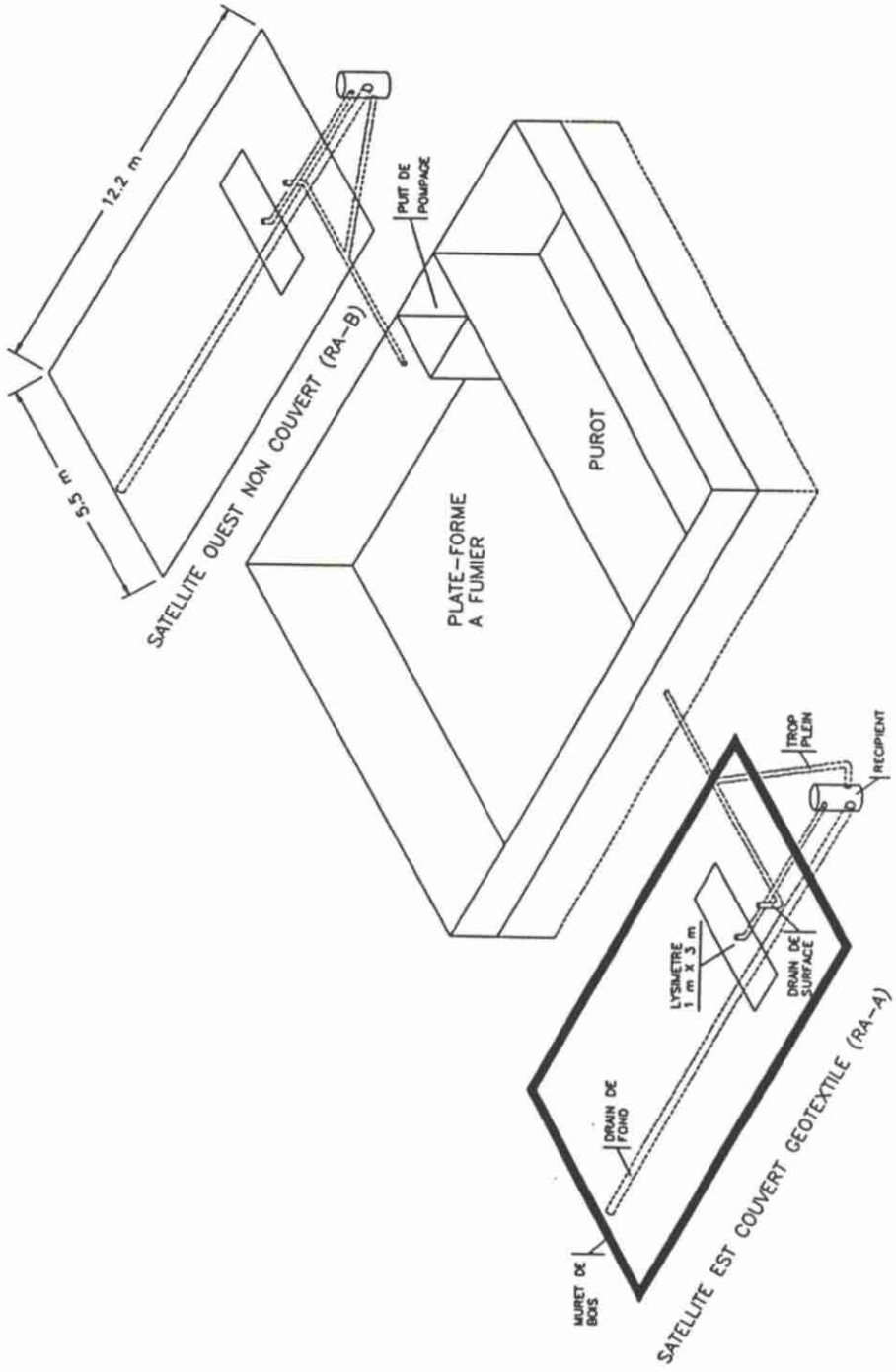



**Figure 5.3 : Description du système d'entreposage à la ferme R. Allard**

#### 5.3.1.6.1 Ferme RA

Le fumier utilisé aux deux emplacements (ferme RA et CRIQ) provenait de la ferme RA. Il est composé de 2,8 à 3,2 kg de paille/u.a.-j et est produit par l'équivalent de 44 u.a. À la ferme RA, le fumier est évacué à l'aide d'un évacuateur souterrain (piston) dans un entrepôt à fumier couvert.

Les essais ont permis d'établir le bilan massique, de suivre le déroulement des processus de compostage par la prise de températures dans la masse de compost et de mesurer le volume de liquides qui s'écoule de chacune des plates-formes satellites (couverte et non-couverte).

Tel que présenté à la figure 5.3, le compost de la plate-forme satellite A (Est) est couvert d'un géotextile semi-perméable (compostex 200), tandis que l'andain de la plate-forme satellite B (Ouest) n'est pas couvert. Le volume de lixiviats écoulé de ces plates-formes a été mesuré à l'aide de deux augets basculants.

La fraction liquide qui s'écoule du tas de fumier couvert est pompée dans le purot. La fraction solide du fumier entreposé est déplacée à l'aide du bras mécanique sur les deux plates-formes satellites au début de l'été pour y être compostée avant d'être épandue au champ à l'automne. Les retournements du compost sur les plates-formes satellites sont également réalisés à l'aide du bras mécanique.

#### 5.3.1.6.2 CRIQ

Des essais de compostage en andains se sont déroulés simultanément sur le site expérimental du CRIQ avec le fumier de la ferme RA. La confection de l'andain sur le site du CRIQ a été réalisée à l'aide d'un épandeur à fumier. Les retournements ont été pratiqués avec un retourneur d'andain de marque Sittler. L'andain (A7) avait une largeur d'environ 4 m, une longueur d'environ 8 m pour une surface moyenne de 32 $m^2$. La hauteur initiale de l'andain était de 1,4 m. Le site expérimental utilisé pour cet essai a déjà été présenté à la figure 4.1. Un lit de paille d'orge non-hachée de 15 cm a été disposé sous l'andain pour absorber le lixiviat qui pourrait s'écouler du compost. Le sol sous l'andain est un loam sableux (66,3 % de sable, 22,5 % de limon et 11,2 % d'argile contenant 1,8 % de matière organique).

Un bilan massique complet (masse totale, matière sèche, éléments fertilisants majeurs) a été établi pour la période de compostage (22 mai au 14 octobre 1992) en suivant la même procédure que celle décrite au chapitre 4. Tout au cours de cet essai, le

suivi des températures, des teneurs en oxygène et des paramètres de compostage (pH, TEE, C/N, MO, éléments fertilisants) a été réalisé.

La mesure du volume et la caractérisation des lixiviats produits au cours du compostage ont été effectuées au cours de la période de compostage. Les lixiviats échantillonnés ont été immédiatement placés au réfrigérateur (4 °C) avant d'être analysés. Cependant, certaines analyses sont faites rapidement sur le lixiviat frais. Les lixiviats ont été récoltés à l'aide d'un lysimètre de sable de 1 m x 2 m.

### 5.3.2 DESCRIPTION DES ESSAIS DE COMPOSTAGE

Une description synthèse de l'ensemble des essais de compostage réalisés sur les fermes est présentée aux tableaux 5.2a et 5.2b. Il y est fait mention des particularités de chacun des essais. Les lettres qui identifient le matériel (formulations) utilisé pour les divers essais de compostage (quantités de litière, dates de productions du fumier et des opérations de compostage) servent de références relativement aux analyses des fumiers, composts, lixiviats et sols présentées subséquemment dans le texte.

# TABLEAU 5.2a : DESCRIPTION DES ESSAIS DE COMPOSTAGE

| Ferme | Formulation | Production du fumier | Date des retournements (R) du compost | | | | Composition de la litière (kg/u.a.-j) | | Remarques |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | début | R1 | R2 | R3 | paille | autres | |
| A | | | | | | | | | |
| | A | 02/91..04/91 | 10/06 | 08/07 | 28/08 | | 4 | 1,5 tourbe brune | |
| | B | 12/90..01/91 | 10/06 | 08/07 | 28/08 | | 4 | 2,0 tourbe noire | |
| | C | 05/91..06/91 | 10/06 | 08/07 | 28/08 | | 4 | 1,5 tourbe brune | |
| | D | 06/91..08/91 | 15/08 | 28/08 | | | 4 | 1,3 tourbe blonde | |
| B | | | | | | | | | |
| | A | été 91 | 14/09 | 08/10 | [1] | | 3 | + 1 kg de paille à l'entreposage | - non couvert |
| | B | été 91 | 14/09 | 08/10 | [1] | | 3 | + 1 kg de paille à l'entreposage | - couvert le 9 octobre |
| C | | | | | | | | | |
| | A | 01/91 | 01/91 | 15/05 | 18/06 | 08/08 | 4 | 1 sciure + 1 foin + 0,5 phosphate de roche | |
| | B | 06/91 | 04/07 | 08/08 | | | 4 | 2 sciure + 0,5 phosphate de roche | |
| | C | 07/91 | 04/08 | | | | 4 | 1 sciure + 0,5 phosphate de roche | |
| | D | 10/91 | 11/10 | | | | 4,5 | 2 sciure + 0,5 phosphate de roche | |
| | E | 20..30/05/91 | 25/05 | 18/06 | 08/08 | | 5 | 2 sciure + 0,5 phosphate de roche | |

1) 3 retournements au cours de l'été 1992 après un hiver au champ.

## TABLEAU 5.2b : DESCRIPTION DES ESSAIS DE COMPOSTAGE (SUITE)

| Ferme | Formulation | Production du fumier | Date des retournements (R) du compost | | | | Composition de la litière (kg/u.a.-j) | | Remarques |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | début | R1 | R2 | R3 | paille | autres | |
| IT | | | | | | | | | - compost non retourné |
| | A | été 90 | 10/90 | | non-retourné | | 3 | 1,8 copeaux | - section A couverte |
| | B | été 90 | 10/90 | | non-retourné | | 3 | 1,8 copeaux | - section B non couverte |
| | C | hiver 91 | 16/06/91 | | non-retourné | | | | - formulation spéciale |
| | D | 09/91 | 10/91 | | | | 4 | 1 sciure | |
| | E | 01-06/91 | 06/91 | 28/08 | 10/10 | | 4 | 1 sciure | |
| RA | | | | | | | | | - compostage sur plate-forme satellite |
| | A | 01-06/92 | 05/06 | 19/06 | 31/07 | | 3,2 | | - plate-forme A couvert géotextile semi-perméable |
| | B | | 05/06 | 19/06 | 31/07 | | 3,2 | | - plate-forme B non couvert |
| CRIQ | | 03-06/92 | 22/05 | 18/06 | 23/07 | | 2,8 | | - approche bilan, compostage en andain |
| E | | | | | | | Formulation des 6 traitements:<br>- 3,9 kg de vieux foin<br>- 1,8 kg de résidus d'émondage<br>- 1,3 kg de phosphate de roche | | |
| | A | 01-06/92 | 03/06 | 03/06 | 02/07 | 13/08 | | | - lit de paille sous l'andain |
| | B | 01-06/92 | 03/06 | 03/06 | 02/07 | 13/08 | | | - lit de sciure de bois sous l'andain |
| | C | 01-06/92 | 03/06 | 03/06 | 02/07 | 13/08 | | | - lit de tourbe brune sous l'andain |
| | D | 01-06/92 | 03/06 | 03/06 | 02/07 | 13/08 | | | - Andain couvert: toile semi-perméable géotextile |
| | E | 01-06/92 | 03/06 | 03/06 | 02/07 | 13/08 | | | - Andain couvert: toile imperméable film de polyéthylène noir |
| | F | 01-06/92 | 03/06 | 03/06 | 02/07 | 13/08 | | | - section témoin |

## 5.4 RÉSULTATS

### 5.4.1 FUMIER DE BOVINS

L'origine et la composition distinctes de chacun des fumiers analysés rendent laborieuse la comparaison de ces fumiers entre eux. Chaque ferme possède sa propre technique de gestion du fumier et les différences notamment au niveau du type d'équipement d'évacuation, de la structure pour l'entreposage des fumiers et de la composition de la litière (paille, sciure, copeaux, tourbe, phosphate...) se reflètent sur la variabilité des caractéristiques initiales des fumiers.

Les résultats présentés au tableau 5.3 démontrent qu'il est difficile d'établir des liens entre les caractéristiques du fumier de bovins et la nature des opérations liées à la gestion de ces fumiers. En général, on constate que l'humidité des fumiers de bovins laitiers est très élevée. Il est également intéressant de remarquer que l'humidité du fumier de bovins de boucherie (ferme E) est nettement plus faible que celui issu de la production laitière. Les bouvillons produisent moins de déjections et la quantité de litières utilisés est plus élevée.

Les porosités effectives mesurées ne démontrent pas qu'il est pertinent de procéder à des ajustements de ce paramètre pour des quantités de litière de plus de 5 kg/u.a.-j. Seul le fumier de la ferme B a une faible porosité. Dans ce cas, la faible porosité du fumier mesurée est reliée à sa très grande humidité qui découle de la recirculation du purin sur le fumier lors de son entreposage sous abri.

Des valeurs de C/N d'environ 30 sont obtenues avec le fumier de bovins laitiers dont la litière est composée de paille et de tourbe et avec le fumier de bovins de boucherie. L'addition de matériaux riches en carbone (tourbe, sciure, paille) ainsi que les pertes d'azote (lixiviation, volatilisation) contribueraient à élever la valeur du C/N. En général, le C/N du fumier de bovins laitiers est inférieur à 20 (BIOREX, 1994 et Robert, 1992).

Le taux de respiration mesuré des fumiers à l'étude est très variable (1 847 à 4 952 mg $O_2$/kg s.v.-h). Ces valeurs donnent une indication de l'instabilité du fumier et non de son potentiel à consommer de l'oxygène. Nous avons en effet constaté à quelques occasions, une hausse du taux de respiration après quelques jours de compostage (en phase thermophile).

## TABLEAU 5.3 : CARACTÉRISTIQUES DES FUMIERS

| Ferme ( )[3] | MVA b.h. (kg/m³) | TEE b.h. (%) | pH | Porosité (%) | | CE (mS/cm) | M.O. | Ntot | Ptot | Ktot | C/N | N/P | Taux de respiration (mg $O_2$/kg s.v.-h) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | de drainage [1] | effective [2] | | sur base sèche en (%) | | | | | | |
| A (D) | 664 | 81,5 | 7,2 | 28,3 | 39,5 | 2,5 | 89,4 | 1,76 | 0,44 | 2,25 | 29,5 | 3,96 | 3 510 |
| B (C) | 559 | 84,8 | - | 3,3 | 9,6 | - | 85,7 | - | - | - | - | - | 4 952 |
| C (D) | - | 73,8 | 8,7 | 42,0 | 50,5 | 8,0 | - | 1,25 | 0,31 | 2,24 | - | 3,97 | 1 847 |
| IT | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| RA | - | 79,7 | - | - | - | - | - | 2,64 | 1,25 | 2,78 | - | 2,11 | - |
| CRIQ | 800 | 75,9 | 8,05 | 37,5 | 57,5 | 12,4 | 73,1 | 2,64 | 1,01 | 2,42 | 16,1 | 2,61 | 2 481 |
| E | - | 73,7 | - | 46,6 | 61,1 | - | 87,6 | 1,64 | 0,49 | 2,17 | 31,9 | 3,33 | 2 715 |

(1) Après 1 heure d'égouttement suivant la saturation.
(2) À la teneur en eau du fumier échantillonné.
(3) (Formulation)

A (D) : Fumier composé de 4 kg/u.a.-j de paille + 1,3 kg/u.a.-j de tourbe jaune.
B (C) : Fumier composé de 3 kg/u.a.-j de paille + 1,0 kg/u.a.-j de paille à l'entreposage.
C (D) : Fumier composé de 4,5 kg/u.a.-j de paille + 2,0 kg/u.a.-j de sciure + 0,5 kg/u.a.-j de phosphate de roche.
RA : Fumier composé de 3,2 kg/u.a.-j de paille.
CRIQ : Fumier composé de 2,8 kg/u.a.-j de paille.
E : Fumier de bovins de boucherie composé de 1,9 kg/u.a.-j de vieux foin + 3,9 kg/u.a.-j de résidus d'émondage + 1,3 kg/u.a.-j de phosphate de roche.

## 5.4.2 COMPOSTS

Au cours des différentes visites de fermes, des composts en andain de 13 à 444 jours ont été échantillonnés pour analyse. Les résultats de l'analyse de ces composts sont présentés au tableau 5.4a et 5.4b. Le tableau 5.4a présente les caractéristiques des composts échantillonnés lors des visites ponctuelles effectuées sur les sites de compostage. Le tableau 5.4b présente l'évolution des teneurs des composts pour les fermes où le suivi a été plus rigoureux.

Les teneurs en eau b.h. des composts pour l'ensemble des analyses varient de 64,3 à 85,5 %. Aucun lien de cause à effet n'est établi entre la teneur en eau et la durée du compostage. La teneur en eau la plus faible est obtenue avec le fumier de bovins de boucherie couvert d'une toile géotextile pendant la période complète de compostage. Pour le fumier de bovins laitiers, la TEE la plus élevée a été mesurée pour un compost couvert d'une toile de plastique appliquée au cours de l'automne. Des TEE très élevées ont également été mesurées pour des composts non couverts. A titre comparatif, sur les plates-formes du CRIQ, nous avons mesuré des TEE à la fin des essais de compostage comprisent entre 79 et 82 % pour les composts non-couverts et entre 69 et 75 % pour les composts couverts.

Pour l'ensemble des composts analysés, les teneurs en matière organique b.h. des composts varient de 100 à 290 kg/tonne. Au CRIQ sur les plates-formes, des teneurs moyennes de MO de 144 kg/tonne pour les composts non couverts et de 171 kg/tonne pour les composts couverts ont été obtenues.

La teneur en azote b.h. varie pour l'ensemble des composts de fumiers de bovins laitiers entre 3,1 et 8,2 kg/tonne. Les teneurs en azote des composts (C1 à C6) au CRIQ se situaient entre 6,0 et 7,2 kg/tonne.

La teneur en phosphore total et en potassium total de ces composts se situe respectivement entre 1,0 et 4,0 kg/tonne et entre 3,1 et 9,5 kg/tonne. Au CRIQ, les teneurs en phosphore des composts couverts se situaient entre 3,8 et 5,8 kg/tonne tandis que pour les composts non couverts, elles se situaient entre 2,4 et 3,5 kg/tonne. Pour le potassium, des teneurs comprisent entre 3,5 et 5,4 kg/tonne ont été mesurées pour les composts non couverts et entre 10,4 et 13,4 kg/tonne pour les composts couverts. On remarquera que les teneurs en azote, phosphore et potassium du compost couvert de la ferme RA sont après 126 jours de compostage de 1,5 à 2,0 fois plus élevées que celles du compost non couvert.

À la ferme E (bovins de boucherie), les teneurs en azote des composts (à la fin : 72 jours) sont parmi les plus élevées. L'utilisation d'une toile semi-perméable (géotextile) pour le recouvrement de l'andain a permis de produire un compost dont la teneur en azote et potassium est plus élevée que celle du compost témoin et du compost couvert de la toile imperméable de polyéthylène. De façon générale l'utilisation de recouvrement adapté au compostage permet d'augmenter significativement (plus du double) la teneur en potassium du compost; les teneurs en phosphore et en azote sont pour leur part un peu plus élevées (25 à 50 % plus) dans les composts couverts comparativement aux composts non couverts.

Le pH des composts sur les fermes de 13 à 444 jours se situe entre 7,7 et 8,5. Au CRIQ après 140 jours, ce paramètre se situait à une valeur d'environ 8,3 pour les composts non couverts (C3 à C6).

La conductivité électrique des composts sur les fermes est comprise entre 1,4 et 11,8 mS/cm. Les porosités effectives des composts sont comprises entre 15,9 et 63,9 %.

Le rapport C/N se situe, pour l'ensemble des composts de fumier de bovins laitiers, entre 9,5 et 21,4 et le taux de respiration entre 248 et 3 897 mg $O_2$/kg s.v.-h selon la maturité des produits. Le C/N des composts (C1 à C6) au CRIQ se situaient à la fin des essais de compostage à environ 13 et le taux de respiration des composts non couverts et retourné (C3, C4 et C6) à 570 mg $O_2$/kg s.v.-h.

L'effet du gel-dégel et le compostage au cours d'une deuxième saison a une influence sur les caractéristiques du compost. Ainsi, après cette période, la teneur en potassium et la conductivité électrique des composts de la deuxième année sont beaucoup plus faibles que celles des composts de la première année. On peut penser que le phénomène de lixiviation est amplifié par l'effet combiné du gel-dégel du compost et de l'eau de fonte des neiges.

Pour l'ensemble des paramètres mesurés, on constate que les écarts entre les valeurs minimales et maximales sont très importants. Les variations observées proviennent d'un ensemble de variables: caractéristiques du fumier frais, période de compostage (saison) et temps de compostage, quantité et intensité des précipitations, nombre de retournements, taille des andains, recouvrement des andains et méthodes d'échantillonnage.

En exprimant les valeurs en N-P-K du tableau 5.4 sur une base sèche, l'observation générale suivante est dégagée:

Les teneurs en Ntot et en Ptot augmentent dans les composts au fur et à mesure du compostage. Les teneurs en Ktot quant à elles diminuent généralement lors du compostage sauf lorsque le compost est couvert.

## TABLEAU 5.4a : VALEUR AGRONOMIQUE DES COMPOSTS

| Caractéristique | Fermes | A | | | B | | | | | C | IT | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Formulations | D | D | D | A | A | A | B | B | E | A | B |
| Durée (jours) | | 13 | 88 | 444 | 25 | 60 | 348 | 60 | 348 | 75 | 300 | 300 |
| TEE b.h. (%) | | 73,0 | 77,9 | 64,4 | 80,9 | 82,5 | 85,5 | 83,2 | 75,2 | 68,5 | 68,9 | 72,7 |
| M.O. b.h.(kg/tonne) | | 180 | 129 | 177 | 163 | 148 | 112 | 134 | 109 | 210 | 117 | 100 |
| pH | | 8,3 | 8,2 | 8,2 | 7,8 | 8,1 | 7,7 | 8,2 | 7,8 | 8,5 | - | - |
| CE (mS/cm) | | 6,8 | 7,3 | 1,4 | 9,6 | 6,9 | 4,3 | 9,8 | 2,1 | 4,7 | 4,4 | 3,6 |
| Ntot b.h. (kg/tonne) | | 5,2 | 4,0 | 6,8 | 1,2 [1] | 4,0 | 3,9 | 4,5 | 4,9 | 6,2 | - | - |
| Ptot b.h. (kg/tonne) | | 1,4 | 1,6 | 1,7 | 1,0 | 1,3 | 1,2 | 1,3 | 2,9 | 2,6 | - | - |
| Ktot b.h. (kg/tonne) | | 5,2 | 5,3 | 3,7 | 5,4 | 4,2 | 3,1 | 5,2 | 3,8 | 9,1 | - | - |
| Taux de respiration (mg $O_2$/kg s.v.-h) | | 3 740 | 563 | 286 | 3 897 | 2 224 | 810 | 3 508 | 248 | 867 | 430 | 330 |
| Porosité de drainage (%) | | 42,1 | 27,3 | - | 32,0 | 29,5 | - | 21,9 | - | 36,7 | 14,2 | 16,5 |
| Porosité effective (%) | | 63,9 | 38,5 | - | 47,2 | 41,5 | - | 37,3 | - | 57,5 | 25,9 | 31,5 |
| C/N | | 20,0 | 18,7 | 15,1 | 40,7 [1] | 21,4 | 16,6 | 17,9 | 12,9 | 19,6 | - | - |

1) Valeur peu probable.
B-A : Compost non couvert.
B-B : Compost couvert.
IT-A : Compost couvert.
IT-B : Compost non couvert.

## TABLEAU 5.4b : VALEUR AGRONOMIQUE DES COMPOSTS (SUITE)

| Caractéristique | Fermes | RA | | CRIQ | | | | E | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Formulations | A | B | | | | | D | D | E | E | F | F |
| Durée (jours) | | 104 | 104 | 27 | 62 | 116 | 145 | 29 | 72 | 29 | 72 | 29 | 72 |
| TEE b.h. (%) | | 72,5 | 75,6 | 75,6 | 74,9 | 77,6 | 78,9 | 69,4 | 64,3 | 75,2 | 73,1 | 75,2 | 74,1 |
| M.O. b.h. (kg/tonne) | | - | - | 181 | 167 | 142 | 135 | 251 | 290 | 209 | 197 | 195 | 210 |
| pH | | - | - | 8,2 | 8,4 | 8,0 | 8,5 | 8,3 | 8,1 | 8,2 | 8,3 | 8,2 | 8,1 |
| CE (mS/cm) | | - | - | 11,8 | 7,2 | 5,2 | 3,9 | - | - | - | - | - | - |
| Ntot b.h. (kg/tonne) | | 9,7 | 6,6 | 13,8 [1] | 7,0 | 7,1 | 8,2 | 4,5 | 10,9 | 3,8 | 8,0 | 3,7 | 7,7 |
| Ptot b.h. (kg/tonne) | | 4,1 | 4,0 | 2,9 | 3,6 | 3,5 | 3,7 | 1,8 | 2,5 | 1,4 | 2,1 | 2,1 | 2,2 |
| Ktot b.h. (kg/tonne) | | 8,4 | 5,5 | 6,1 | 6,2 | 5,2 | 4,6 | 7,5 | 9,5 | 5,2 | 6,4 | 5,5 | 6,2 |
| Taux de respiration (mg $O_2$/kg s.v.-h) | | 450 | - | 1 313 | 801 | - | 519 | 677 | - | 554 | - | 537 | - |
| Porosité de drainage (%) | | - | - | 30,2 | 21,0 | - | 4,9 | - | - | - | - | - | - |
| Porosité effective (%) | | - | - | 49,1 | 35,1 | - | 15,9 | - | - | - | - | - | - |
| C/N | | - | - | 7,6 [1] | 13,8 | 11,6 | 9,5 | 32,7 | 15,4 | 31,8 | 14,4 | - | 15,9 |

1) Valeur peu probable.
RA-A : Compost couvert de la toile semi-perméable : géotextile.
RA-B : Compost non couvert.
E-D : Compost couvert toile semi-perméable : géotextile.
E-E : Compost couvert toile imperméable : film de polyéthylène.
E-F : Compost non couvert.
CRIQ : Compost non couvert.

## 5.4.3 ÉVOLUTION DES PARAMÈTRES

### 5.4.3.1 Température et oxygène

Lors des visites ponctuelles effectuées sur les fermes A, B, C et IT, les températures et les teneurs en oxygène des composts ont été mesurées dans les divers andains. Pour les andains de ces fermes, la température et la teneur en oxygène ont été mesurées avant le retournement et de une à cinq heures après le passage du retourneur d'andain.

Lors de la mise en andain du fumier, des températures variant entre 55 et 60 °C ont été mesurées aux fermes A et C. Pour ces mêmes points de mesure, la teneur en oxygène de ces composts est pratiquement nulle. Selon la période de mise en andain et l'humidité du matériel, les températures des andains descendent plus ou moins rapidement lors du compostage.

En général, la température du compost est moins influencée par le retournement que la teneur en oxygène. En effet, la baisse en température a été nulle ou de quelques degrés [0 - 7 °C] après les retournements. Par contre, la teneur en oxygène des composts jeunes monte rapidement, immédiatement après le retournement pour redescendre toute aussi rapidement après. À la ferme A par exemple, pour un compost de 13 jours dont la température moyenne était d'environ 50 °C, les teneurs en oxygène à 50 cm de la surface (mi-hauteur) variaient de 0,3 à 3,0 % avant le retournement et de 6,4 à 12,6 % immédiatement après le retournement. Elles étaient nulles partout dans le compost 2,5 heures après le retournement. De toute évidence, les retournements mécaniques du compost ne suffisent pas à conserver les teneurs optimales en oxygène dans le compost et ce, pour la période active de compostage.

Un suivi plus rigoureux des températures des composts en andain a été réalisé aux fermes RA et E ainsi qu'au CRIQ pour la durée complète des essais de compostage. L'évolution de ce paramètre est présentée aux figures 5.4 pour les essais à la ferme RA et au CRIQ et 5.5 pour les essais à la ferme E.

À la ferme RA, la température moyenne du compost couvert d'un géotextile est plus élevée que celle du compost non couvert d'environ 11 °C (30 °C non couvert et 41 °C couvert). Ces deux traitements ont été brassés à l'aide du bras mécanique. Pour un fumier de même provenance, le compostage en andain avec retournements mécaniques (retourneur d'andain Sittler) au CRIQ, les températures en début de compostage sont plus élevées (valeur maximale de 63 °C) qu'à la ferme RA. La

teneur en eau du fumier RA mesurée au début des essais de compostage était de 79,7 % à la ferme RA et de 75,9 % au CRIQ. La TEE du fumier est un facteur qui influence de façon étroite la température du compost. De façon générale, plus la teneur en eau est élevée plus l'élévation de la température sera faible. Cette observation a aussi été constaté pour les composts sur plates-formes de béton.

Durant les 30 premiers jours de compostage, la teneur en oxygène du compost de l'andain du CRIQ (A7) s'est maintenue à 0 %. Par la suite, elle s'est élevée progressivement pour atteindre des teneurs d'environ 15 % après 3 mois de compostage. L'évolution de la teneur en oxygène du compost A7 s'est comportée de la même manière que celle des composts C3 à C6 sur plate-forme de béton.

L'évolution des températures de ce compost (A7) a suivi la même tendance que celle du compost C6 sur plate-forme de béton au CRIQ. En général, les températures ont été plus faibles pour ces composts (A7 et C6) que pour les composts plus sec (fumier C3 en début de compostage à 73,9 % de TEE) ou plus pailleux (C4 et C5 à 6,4 kg de paille / u.a.-j).

Tel que présenté à la figure 5.5, l'élévation de température du fumier de bovins de boucherie à la ferme E s'est produite très rapidement; 8 jours après la mise en andain, des températures de 65 °C et plus ont été mesurées à chacune des sections de l'andain. La teneur en eau de ce fumier au début des essais de compostage était de 73,7 %.

Par la suite, le compost couvert d'une toile imperméable (section E) s'est refroidi plus rapidement que le compost témoin (section F) et le compost couvert de la toile semi-perméable (section D). En moyenne, la température du compost couvert de la toile imperméable a été de 5 °C inférieure à celle du compost témoin et à plus de 10 °C inférieure à celle du compost couvert de la toile géotextile semi-perméable.

De façon générale, les composts de fumier de bovins de boucherie suivent une élévation de la température plus importante en début de compostage, plus près de la courbe d'évolution optimum théorique, que les composts plus humides de fumier de bovins laitiers. Une teneur en eau plus faible et un meilleur rapport C/N pour ce type de fumier expliquent ce constat.

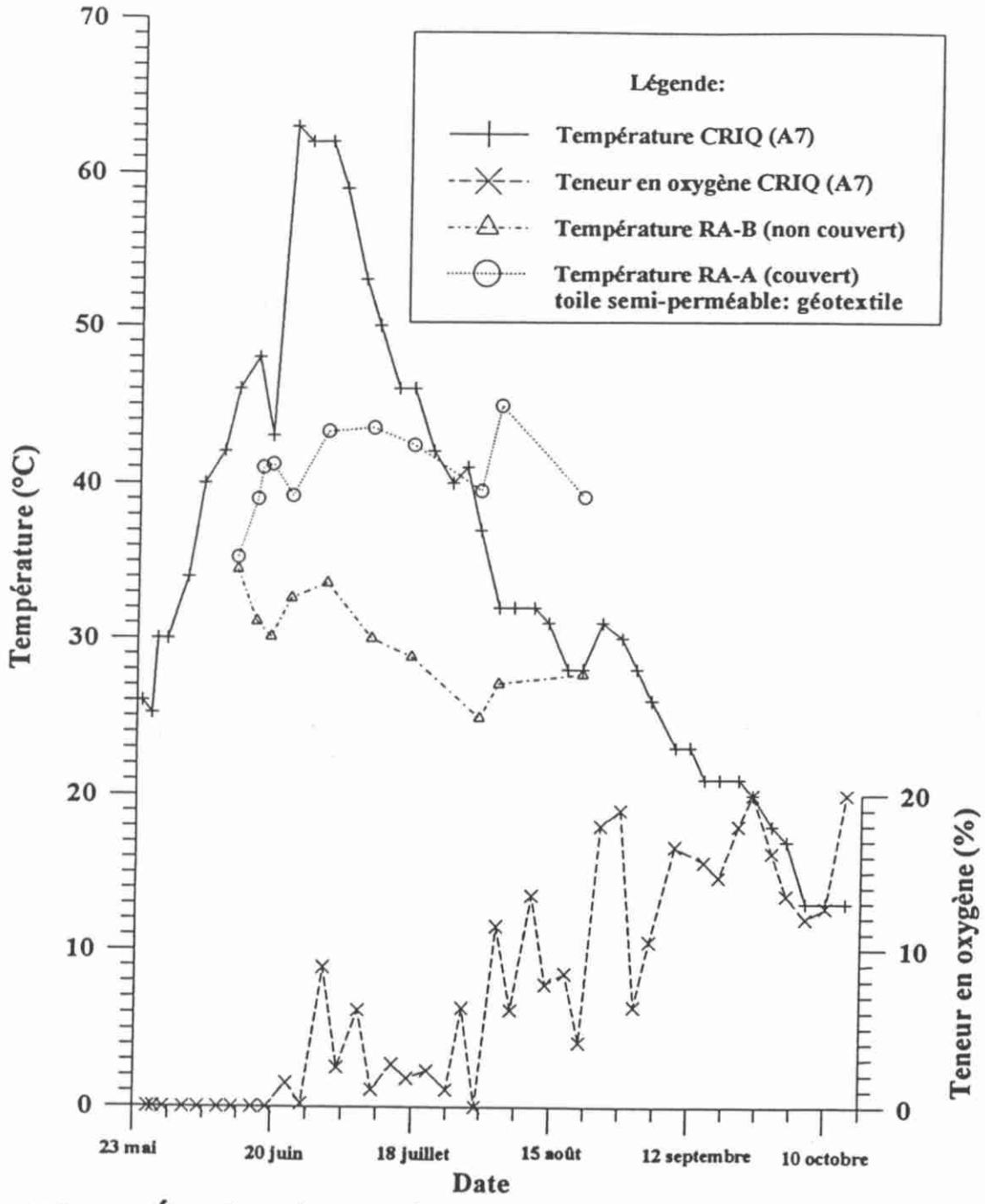



Figure 5.4 : Évolution des températures et teneurs en oxygène en cours de compostage des composts de l'andain A7 du CRIQ et des plates-formes satellites de la ferme RA

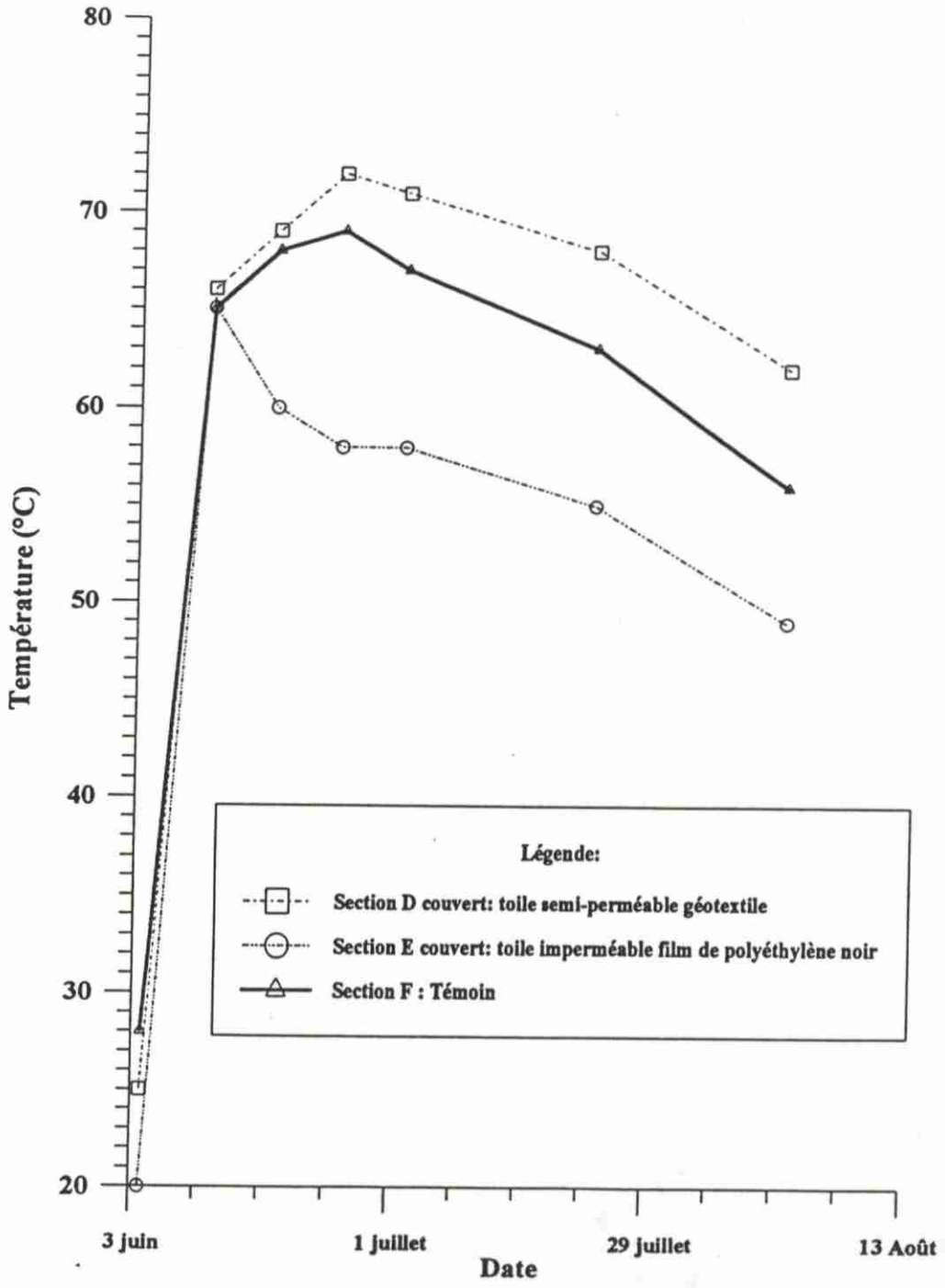



Figure 5.5 : Évolution des températures des composts de la ferme E

### 5.4.4 PERTES EN COURS DE COMPOSTAGE

Les essais de compostage réalisés sur le site de compostage du CRIQ ont permis d'établir le bilan massique complet des pertes pour une période de compostage de 145 jours. Les résultats des pertes basées sur les contenus initiaux et finaux dans les composts sont présentés au tableau 5.5. De même, des résultats partiels sont établis pour les andains sur les plates-formes satellites à la ferme RA.

**TABLEAU 5.5 : PERTES EN COURS DE COMPOSTAGE À L'ANDAIN A7 AU CRIQ**

| | PERTE (%) |
|---|---|
| VOLUME TOTAL | 51,5 |
| MASSE TOTALE | 51,7 |
| MASSE D'EAU | 49,8 |
| MASSE DE MATIÈRE SÈCHE | 57,7 |
| MASSE DE MATIÈRE ORGANIQUE | 63,0 |
| MASSE D'AZOTE TOTALE | 37,9 |
| MASSE DE PHOSPHORE TOTAL | 26,3 |
| MASSE DE POTASSIUM TOTAL | 60,7 |

Les pertes de volume, de masse totale, de matière sèche, de matière organique et de potassium mesurées au CRIQ pour le compostage sur sol de l'andain A7, sont semblables aux pertes obtenues pour les essais de compostage sur plate-forme de béton pour les traitements non couverts (cf chapitre 4). Pour le phosphore, elles sont supérieures aux pertes sur plates-formes de béton (26 % vs 12 à 24 %). Ces pertes plus élevés en phosphore pour le compost A7 par rapport aux autres composts s'expliqueraient par une teneur plus élevée en phosphore total dans le fumier A7 de départ (1,0 % b.s.) que celle des autres fumiers (0,62 à 0,85 % b.s.). L'entreposage sous abri du fumier permettrait de protéger le fumier du lessivage par les précipitations et d'obtenir un fumier dont les teneurs en phosphore et en potassium seraient plus élevées en début de compostage. Les pertes d'azote de l'andain A7 (38 %) se comparent aux plus faibles pertes obtenues sur plate-forme de béton (37 - 64 %). Le fumier A7 tout comme le fumier C6 (avec 37 % de pertes d'azote) contenait de plus

faible teneur en azote total (2,6 % b.s. pour A7) que les autres fumiers C3 à 3,1 % b.s., C4 à 3,5 % et C5 à 3,7 %.

Les mesures prises par BPR (1994) à la ferme RA permettraient d'établir des pertes de masse de 43 % pour le compost couvert (RA-A) et de 28 % pour le compost non couvert (RA-B). Le fumier A7 (à 2,64 % d'azote totale), tout comme le fumier C6 (à 2,42 % b.s. d'azote totale) avec lequel on a eu 37 % de perte d'azote, contenait de plus faible teneur en azote que les autres fumiers à l'essai au CRIQ sur plates-formes de béton (C3 à 3,1 %, C4 à 3,5 % et C5 à 3,7 % d'azote totale).

### 5.4.5 LIXIVIATS

Les caractéristiques des lixiviats qui se sont écoulés des andains de composts ont été établies pour les fermes suivantes : B, C, IT, E et CRIQ. Ces résultats sont présentés aux tableaux 5.6 à 5.10.

La production de lixiviats récoltés par les lysimètres est exprimé en mL de lixiviats par $m^2$ de lysimètre par jour. Ces valeurs correspondent à un taux de production surfacique moyen; le volume total de lixiviats récoltés étant divisé par le nombre de jours de la période de récolte et par la surface du lysimètre.

#### 5.4.5.1 Ferme B

La caractérisation des lixiviats issus du compost couvert d'une toile imperméable (film de polyéthylène noir) et du compost non couvert a été réalisée à la ferme B au cours de l'automne 1991 et de l'été 1992. Les résultats de la caractérisation des lixiviats produits sur cette ferme sont présentés au tableau 5.6. La récolte des lixiviats s'est poursuivie après l'hiver soit au printemps suivant, afin de suivre l'évolution des caractéristiques des lixiviats. Le premier lixiviat de l'année 1992 a été recueilli le 1er avril. Nous ne savons pas si des lixiviats ont été produits avant cette date.

Au cours de l'automne 1991, le volume de lixiviats récolté par le lysimètre de 1,5 $m^2$ a été de 4,41 L pour l'andain couvert. À la section non couverte, le volume de lixiviats récolté a été de 1,65 L pour la même période. Il est possible que la pente du terrain ait favorisée l'augmentation du volume de lixiviats de la section couverte qui se trouvait dans la partie la plus basse du terrain. Les lysimètres installés sur cette ferme ont pu capter des éléments fertilisants et se colmater. En effet, les lysimètres de cette ferme étaient constitués de sol agricole et du gazon déjà en place.

La TEE b.h. de ces composts au jour 60 était d'environ 83 %. À ces valeurs, le compost est saturé en eau et la lixiviation apparaît inévitable. Le dernier lixiviat prélevé en 1991 a été récolté le 2 décembre. Lors du compostage de l'automne 1991, les lixiviats issus de l'andain couvert ont été plus chargés que ceux de l'andain non couvert.

TABLEAU 5.6 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS ISSUS DES ANDAINS DE COMPOSTS À LA FERME B

| Caractéristique | ANDAIN B (couvert) | | | | | | | | ANDAIN A (non couvert) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1991: Début 15/09 | | | | | 1992: Début /04 | | | 1991: Début 15/09 | | 1992: Début /04 | | |
| Durée du compostage (jour) | 30 [a] | 41 | 54 | 68 | 78 | 228 | 260 | 346 | 42 | 75 | 228 | 260 | 346 |
| Nombre de jours de récolte | 6 | 11 | 13 | 14 | 10 | 4 | 32 | 86 | 42 | 33 | 4 | 32 | 86 |
| Précipitation (mm) | 42,5 | 32,2 | 53,0 | 6,6 + neige | 5,0 + neige | 21,0 | 44,6 | 416,4 | 122,7 | 16,6 | 21,0 | 44,6 | 416,4 |
| Volume de lixiviats ($mL/m^2$-j) | 101,1 | 56,4 | 55,9 | 47,1 | 32,7 | - | 20,8 | 7,8 | 28,5 | 17,8 | - | 20,8 | 7,8 |
| pH | 6,6 | 6,9 | 7,2 | 7,4 | 6,9 | 7,8 | 7,9 | 7,3 | 7,1 | 7,4 | 7,9 | 7,4 | 7,1 |
| CE (mS/cm) | 15,3 | 18,3 | 18,3 | 16,8 | 19,2 | 4,3 | 5,94 | 6,1 | 12,9 | 13,9 | 3,2 | 6,34 | 5,06 |
| Teneur en eau b.h. (%) | 98,1 | 97,9 | 97,9 | 98,4 | 98,0 | 99,62 | 99,41 | 99,4 | 98,6 | 98,5 | 99,6 | 99,4 | 99,6 |
| Matière en suspension (%) | 0,11 | 0,08 | 0,14 | 0,06 | 0,16 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,09 | 0,05 | 0,05 | 0,03 | 0,02 |
| Azote total b.h. (mg/kg) | 1 400 | 1 500 | 1 300[c] | 1 400 | 1 200 | 240 | 290 | 270 | 810 | 1 000 | 220 | 440 | 310 |
| Azote ammoniacal b.h. (mg/kg) | 1 070 | 1 300 | 1 300 [c] | 1 100 | n.d. | 170 | 160 | 150 | 630 | 700 | 140 | 350 | 240 |
| Nitrate b.h. (mg/kg) | 40 | 50 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| Phosphore b.h. (mg/kg) | 38,6 | 24,7 | 23,8 | 25,7 | - | 15,53 | 34,6 | n.d. | 16,1 | 14,5 | 21,5 | 11,7 | n.d. |
| Potassium b.h. (mg/kg) | 2 385 | 2 794 | 2 965 | 2 832 | - | 864 | 1 352 | n.d. | 1 805 | 2 014 | 544 | 1 053 | n.d. |
| DCO (mg $O_2$/L) | 24 235 | 24 077 | 21 067 | 17 662 | 24 314 | 1 650 | 3 703 | 3 459 | 12 910 | 13 741 | 1 904 | 5 438 | 2 722 |
| $DBO_5$ (mg $O_2$/L) | >5 800 | 20 350 [b] | 13 711 | 10 096 | - | 577 | 607 | n.d. | 13 182 [b] | 7 008 | 1 274 | 2 738 | n.d. |

a : L'andain B a été recouvert d'une toile imperméable le 19 octobre;
lors de l'échantillonnage du 1er lixiviat du compost B, l'andain n'était pas couvert.
b : Résultats plus élevés que leur valeur réelle (difficultés techniques).
c : Analyse faite sur échantillon congelé.

Le volume total de lixiviats récolté par lysimètre de 1,5 m² au cours de 1992 (avril-août) a été de 3 L pour les composts couverts et non couverts. Les caractéristiques des lixiviats de l'andain couvert et non couvert récoltés en 1992 sont semblables pour la plupart des paramètres à l'étude.

Tous les lixiviats récoltés au cours de la deuxième année, après un hiver au champ, sont moins concentrés que ceux récoltés à l'automne de la première année et ce, pour l'andain couvert et non couvert. À titre d'exemple, la conductivité électrique du lixiviat de l'andain couvert récolté à l'automne 1991 est 3 fois plus élevée que celle de l'été suivant. La DCO du lixiviat non couvert de l'automne 1991 est 3,6 fois plus élevée que celle de l'été suivant. La teneur en phosphore et le pH du lixiviat sont demeurés similaires après un hiver au champ.

Le volume de lixiviats récolté par les lysimètres est compris entre 7,8 et 101,1 mL/m²-j. On constate que la production de lixiviats est nettement plus importante au début du compostage et diminue par la suite. De plus, la même tendance est observée au cours de la deuxième année; l'action du dégel du compost au printemps et la fonte des neiges provoque une production importante de lixiviats en début de saison.

#### 5.4.5.2 Ferme C

Les lixiviats de la ferme C ont été échantillonnés à l'automne 1991 et au printemps 1992. L'effet des conditions climatiques hivernales sur les caractéristiques des lixiviats a ainsi pu être évalué. Les caractéristiques des lixiviats récoltés sur cette ferme sont présentés au tableau 5.7. À la ferme C, les lixiviats récoltés au printemps 1992 ont sensiblement les mêmes caractéristiques que les lixiviats récoltés à l'automne 1991. Les essais de compostage à cette ferme ont débuté plus tard que ceux de la ferme B et il est possible que la période de démarrage du compostage influence les caractéristiques des lixiviats dans le temps.

Le lixiviat du compost de la ferme C a été produit principalement en début de compostage. En effet, un volume de 8 L de lixiviats a été récolté le 4 novembre dans le lysimètre du compost mis en andain le 30 octobre; cette valeur correspond à 800 mL/m²-j. La TEE b.h. du fumier mis en andain le 30 octobre était d'environ 74 %. Lors de l'entreposage temporaire du fumier, une quantité indéterminée de purin se retrouve sur le plancher de la benne. Cette fraction liquide a pu être captée par le lysimètre suite à la formation de l'andain. Ceci expliquerait que le volume de lixiviat récolté est plus élevé qu'aux autres fermes.

Le volume de lixiviats produit au printemps 1992 est beaucoup moins important qu'à l'automne 1991. Le volume de lixiviats produit correspond à un volume quotidien de lixiviats variant de 3,8 à 11 mL/m$^2$ - j.

TABLEAU 5.7 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS ISSUS DES ANDAINS DE COMPOST À LA FERME C

| Caractéristique | Lysimètre 2 Andain D: début le 30 octobre 1991 | | | | Lysimètre 1 ANDAIN D : début le 14 octobre 1991 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 91 | 92 [b] | | | 91 | | 92 [b] |
| Nombre de jours de compostage | 5 | 229 | 265 | 287 | 3 [a] | 21 | 245 |
| Nombre de jours de récolte | 5 | 43 | 36 | 22 | 3 | 18 | 43 |
| Précipitation (mm) | 2,5 | 64,0 | 191,0 | 90,0 | 24,0 | 49,5 | 64,0 |
| Volume de lixiviats ($mL/m^2$-j) | 800,0 | 11,0 | 3,8 | 10,5 | 1 067,0 | 17,1 | 6,3 |
| pH | 6,4 | 7,7 | 7,4 | 7,7 | 7,5 | 8,1 | 8,0 |
| CE (mS/cm) | 15,7 | 11,0 | 14,9 | 14,8 | 12,5 | 19,0 | 16,2 |
| Teneur en eau b.h. (%) | 98,4 | 98,5 | 98,2 | 98,2 | 98,4 | 98,4 | 98,71 |
| Matière en suspension (%) | 0,03 | 0,05 | n.d. | 0,01 | 0,11 | 0,02 | 0,03 |
| Azote total b.h. (mg/kg) | 1 600 | 3 870 | 990 | 850 | 1 460 | 6 000 | 1 260 |
| Azote ammoniacal b.h. (mg/kg) | 1 300 | n.d. | 540 | 670 | 1 000 | 1 500 | n.d. |
| Nitrate b.h. (mg/kg) | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 12 | n.d. | n.d. |
| Phosphore b.h. (mg/kg) | 35,8 | 21,12 | 41,06 | n.d. | 36,3 | 13,8 | 11,45 |
| Potassium b.h. (mg/kg) | 3 455 | 3 630 | 4 487 | n.d. | 3 574 | 4 419 | 3 997 |
| DCO (mg $O_2$/L) | 14 731 | n.d. | 10 396 | 10 988 | 15 127 | 9 346 | n.d. |
| $DBO_5$ (mg $O_2$/L) | 6 897 | n.d. | n.d. | n.d. | > 6 100 | 2 662 | n.d. |

a : Lixiviats recueillis en partie lorsque le lysimètre était recouvert de fumier et en partie lorsque le lysimètre n'était pas recouvert de fumier.
b : Lixiviats recueillis après un hiver (1991-1992): les premiers lixiviats de 1992 ont été récoltés le 4 mai.

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

### 5.4.5.3 Ferme IT

Les lixiviats de la ferme IT sont issus d'un compost «jeune» de 5 jours et plus et d'un compost plus vieux de 145 jours et plus. Au cours de l'automne 1991 et de l'année suivante, les lixiviats ont été récoltés sous les deux andains à l'aide d'un lysimètre de 2 $m^2$. La date du dernier lixiviat recueilli en 1991 est le 12 décembre. Les caractéristiques des lixiviats provenant de cette ferme sont présentées au tableau 5.8.

Un volume total de lixiviats de 5,94 L a été récolté à l'automne 1991 sur une période de 49 jours pour le «vieux» compost D. Pour la même période de suivi, le «jeune» compost (E) a produit 1,26 L de lixiviats. Pour les lysimètres de cette ferme, le risque de colmatage est élevé. En effet, le sol du lysimètre était de type argileux.

Au printemps 1992, un volume de 4,13 L a été produit par le «vieux» compost (âgé de 329 jours) pour une période de plus de 36 jours. Puisque le moment précis du début de l'écoulement du lixiviat est inconnu, on ne peut établir le volume écoulé par jour ($mL/m^2$-j). Le compost «jeune» (âgé de 234 jours) a produit 0,25 L en 6 jours.

Au début de la récolte en 1991, les lixiviats du «vieux» compost (andain D) sont plus concentrés en éléments que ceux du compost «jeune» pour une même période d'échantillonnage. Ce constat s'applique pour la TEE, N tot, P tot, K tot et la DCO.

Pour le «vieux» compost, les teneurs en azote total et ammoniacal, en phosphore et en potassium et la DCO sont plus faibles pour le lixiviat récolté après un hiver (lixiviats de 1992) que pour celui récolté à l'automne 1991. Dans le cas du «jeune» compost, les teneurs des lixiviats sont plus élevées en azote total et ammoniacal ainsi qu'en potassium après un hiver comparativement aux valeurs initiales de 1991.

Le volume de lixiviats récolté à l'automne 1991 au début de chacun des essais (dans les 20 premiers jours) se situe entre 74 et 207 $mL/m^2$ de lysimètre - j. Par la suite, le volume récolté a été négligeable (3,4 et 4,4 $mL/m^2$-j).

Une production plus importante de lixiviats en début de deuxième saison est obtenue aux fermes IT et B contrairement à ce qui a été observé à la ferme C.

TABLEAU 5.8 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS ISSUS DES ANDAINS DE COMPOST À LA FERME IT

| Caractéristique | ANDAIN D [d] | | | | | ANDAIN E [a] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1991 : Début 5 juin | | | 1992 [c] | | 1991 : Début 10 octobre | | 1992 [c] |
| Nombre de jours de compostage | 145 | 148 | 194 | 329 | 365 | 5 | 64 | 208 |
| Nombre de jours de récolte | 18 | 3 | 43 | - | 36 | 5 | 59 | 6 |
| Précipitation (mm) | 76,8 | 5,8 | 52,6 [e] | 34,0 | 18,4 | 14,6 | 120,6 [b] | 52,4 |
| Volume de lixiviats ($mL/m^2$-j) | 121,4 | 206,7 | 3,4 | - | 8,3 | 74,0 | 4,4 | 23 |
| pH | 7,3 | 7,6 | 7,6 | 7,0 | 7,9 | 6,4 | 7,5 | 7,9 |
| CE (mS/cm) | 10,4 | 9,8 | 11,4 | 1,6 | 6,0 | 7,8 | 8,2 | 8,3 |
| Teneur en eau b.h. (%) | 95,9 | 97,06 | 99,2 | 99,5 | n.d. | 98,9 | 98,8 | n.d. |
| Matière en suspension (%) | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,32 | n.d. | 0,03 | 0,03 | n.d. |
| Azote total b.h. (mg/kg) | 480 | 1 000 | 610 | 180 | 220 | 390 | 3 000 | 690 |
| Azote ammoniacal b.h. (mg/kg) | 170 | 110 | n.d. | 20 | n.d. | 160 | n.d. | 200 |
| Nitrate b.h. (mg/kg) | 492 | 454 | n.d. | - | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| Phosphore b.h. (mg/kg) | 142,9 | 90,9 | n.d. | 21,6 | n.d. | 20,5 | n.d. | 18,6 |
| Potassium b.h. (mg/kg) | 3 777 | 2 769 | n.d. | 346 | n.d. | 1 041 | n.d. | 1 639 |
| DCO (mg $O_2$/L) | 26 452 | 29 700 | 4 277 [f] | 4 189 | 5 331 | 10 930 | 8 712 | 5 331 |
| $DBO_5$ (mg $O_2$/L) | - | - | n.d. | n.d. | n.d. | 4 758 | n.d. | n.d. |

a : Fumier entreposé 1 mois avant sa mise en andain.
b : 120,6 mm de précipitation: 91,3 mm de pluie et 29,3 cm de neige.
c : Les lixiviats récoltés en 1992 proviennent de l'andain qui a été soumis à l'hiver.
d : Fumier entreposé 5 mois avant sa mise en andain.
e : 52,6 mm de précipitation: 23,3 mm de pluie et 29,3 cm de neige.
f : DCO fait sur échantillon congelé.

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

### 5.4.5.4 Ferme E

Au cours des essais de compostage à la ferme E, les lixiviats issus des six traitements de compostage de fumier de bovins de boucherie ont été mesurés et caractérisés. La figure 5.6 présente le volume cumulatif de lixiviats récolté à chacun des lysimètres et la précipitation cumulative pour la période de compostage (3 juin au 25 août 1992).

L'écoulement du lixiviat issu des traitements sans lit absorbant sous l'andain (section D à F) a été très important au début des essais, pour le traitement avec toile imperméable (film de polyéthylène noir) et le traitement témoin. Pour les traitements témoin et toile de polyéthylène, les premiers lixiviats (8 jours) avaient une couleur peu prononcé (liquide clair) et une odeur qui s'apparentait au fumier de bovins de boucherie. De plus, les valeurs en Ntot, Ptot et Ktot ainsi que la DCO de ces lixiviats sont très faibles. Conséquemment, malgré des volumes de lixiviats plus importants, on ne peut conclure que la charge polluante de ces lixiviats est comparativement plus importante que les autres traitements. Le volume de lixiviat récolté rapidement après la mise en andain a atteint 2 915 mL/m$^2$ en 24 heures pour le traitement couvert d'une toile imperméable. Le volume de lixiviats des traitements avec lit absorbant sous l'andain a été moins important en début d'essais. Pour ces derniers traitements, l'écoulement des lixiviats s'est produit de façon plus régulière tout au cours des essais.

Aucun lien de cause à effet entre les précipitations et le volume de lixiviats écoulé n'a pu être établi au cours de ces essais. Malgré une TEE b.h. initiale relativement faible de 73,7 % du fumier, on constate que le recouvrement du compost n'a pas éliminé totalement la production de lixiviats à la base de l'andain. L'utilisation d'une toile imperméable s'est traduite par une production totale de lixiviats supérieure à celle obtenue de l'andain témoin. Tous les autres traitements ont permis de réduire de façon importante la production de lixiviats à la base de l'andain. Le lit de tourbe brune a donné des résultats particulièrement intéressants.

L'utilisation de lits absorbants sous l'andain de compost a permis, pour les trois matériaux à l'essai, de retarder de quelques jours l'écoulement des lixiviats dans le sol et d'en diminuer le volume. Selon nos calculs basés sur le volume de lixiviats récolté par chacun des lysimètres et la capacité d'absorption en eau déterminée en laboratoire, il faudrait respectivement 30 cm de paille, 5 cm de sciure de bois et 5 cm de tourbe brune à la base de l'andain pour absorber complètement les lixiviats écoulés du compost. Ces quantités d'absorbants calculées sont deux fois plus importantes que celles qui ont été utilisées lors des essais. On doit ici noter que ces essais ne se sont pas poursuivis au cours de la période automnale. Dans ce cas, le volume de lixiviats aurait été plus important.

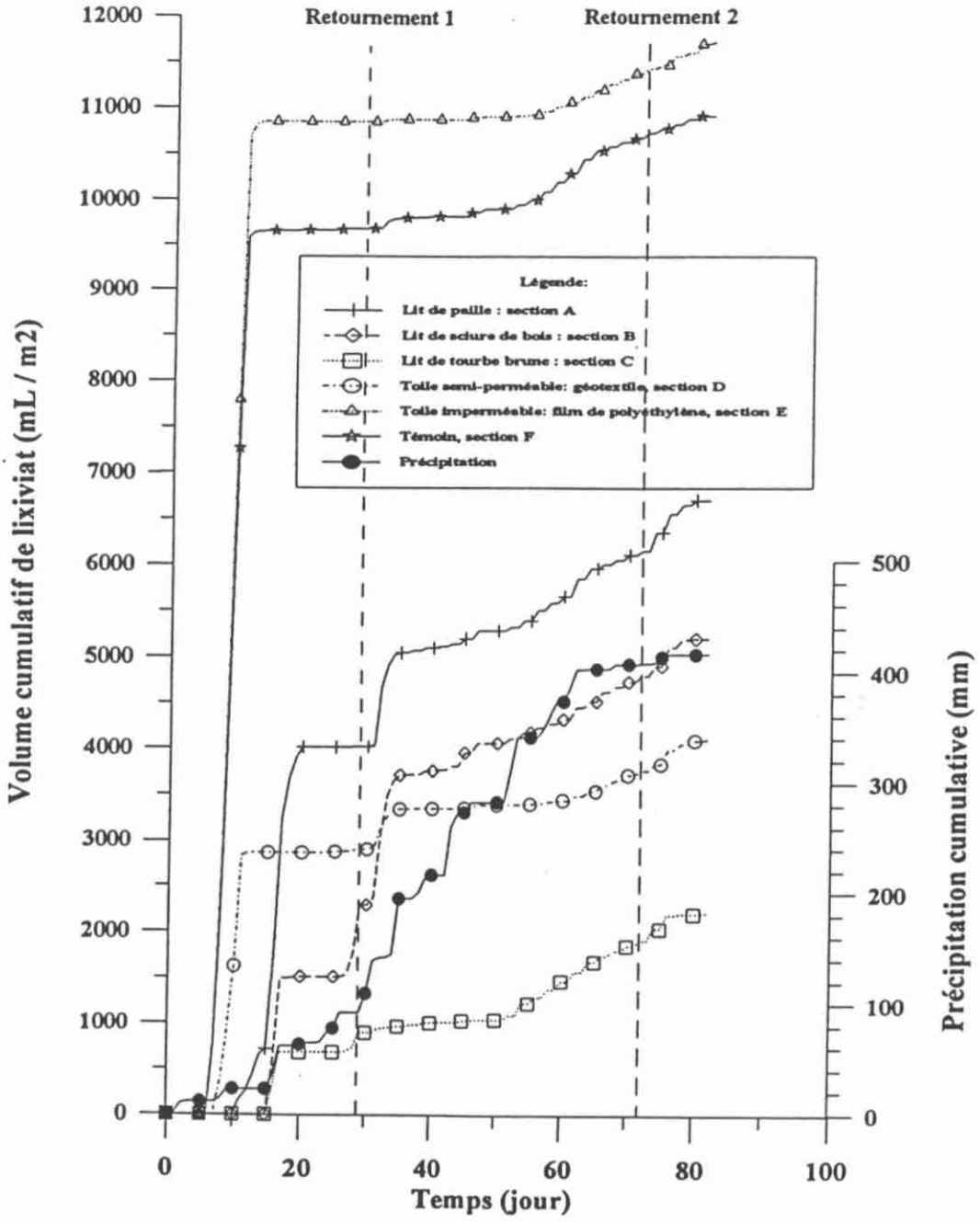



Figure 5.6 : Évolution des volumes de lixiviats et des précipitations en fonction du temps de compostage à la ferme E

Les caractéristiques des lixiviats produits sur cette ferme sont présentés au tableau 5.9. Les lixiviats qui se sont écoulés du compost de fumier de bovins de boucherie possèdent des caractéristiques similaires à ceux du fumier de bovins laitiers. L'évolution des caractéristiques des lixiviats est variable selon le traitement. En effet, les teneurs des lixiviats en NTK, $NH_4$, P tot, K tot et la DCO ont augmenté en cours de compostage pour les traitements B (lit de sciure de bois), E (couvert toile imperméable) et F (témoin). Pour les autres traitements, les teneurs des lixiviats en ces éléments sont demeurées sensiblement les mêmes au cours de la période d'essai. Comme le nombre d'échantillons de lixiviats pour chacun des traitements n'est pas important (3 par traitement), il est délicat de comparer entre eux les caractéristiques des lixiviats.

Après une même période de compostage de 84 jours, le lixiviat récolté sous l'andain couvert d'une toile imperméable (film de polyéthylène noir) est plus concentré que le lixiviat du compost couvert de la toile semi-perméable. Le lixiviat récolté sous l'andain témoin est plus concentré que celui sous l'andain couvert de la toile semi-perméable.

En résumé, les essais de la ferme E permettent de dégager les observations générales suivantes:

- L'utilisation de toiles de recouvrement n'élimine pas la production de lixiviats suite au ressuyage du fumier, ni celle en cours de compostage.

- L'utilisation de lits absorbants à la base de l'andain retarde la production de lixiviats.

TABLEAU 5.9 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS ISSUS DES ANDAINS DE COMPOST À LA FERME E

| Caractéristique | Traitements | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | A | A | B | B | B | C | C | C | D | D | E | E | E | F | F | F |
| Nombre de jours de compostage | 22 | 65 | 84 | 22 | 65 | 84 | 22 | 65 | 84 | 65 | 84 | 8 | 65 | 84 | 8 | 65 | 84 |
| Précipitation (mm) | 77,6 | 325,8 | 13,2 | 77,6 | 325,8 | 13,2 | 77,6 | 325,8 | 13,2 | 403,4 | 13,2 | 14,2 | 389,2 | 13,2 | 14,2 | 389,2 | 13,2 |
| pH | 7,8 | - | 7,5 | 7,9 | - | 7,7 | 7,9 | - | 6,9 | - | 7,9 | 7,5 | 7,7 | 8,2 | 7,6 | - | 7,8 |
| CE (mS/cm) | 11,3 | 5,1 | 9,0 | 3,5 | 8,2 | 10,0 | 6,9 | 8,5 | 7,3 | 2,6 | 6,5 | 4,7 | 12,5 | 16,3 | 5,7 | 5,1 | 7,3 |
| Teneur en eau b.h. (%) | 98,5 | 98,9 | 98,8 | 99,7 | 98,1 | 97,2 | 99,0 | 97,7 | 98,9 | 99,5 | 99,4 | 99,4 | 98,4 | 97,7 | 99,2 | 98,9 | 98,3 |
| Matière en suspension (%) | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,0001 | 0,02 | 0,02 | 0,0001 | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,06 | 0,013 | 0,03 | 0,05 | 0,008 | 0,01 | 0,02 |
| Azote total b.h. (mg/kg) | 1 200 | 560 | 860 | 300 | 860 | 1 300 | 730 | 1 110 | 710 | 240 | 580 | 40 | 1 470 | 1 520 | 40 | 620 | 880 |
| Azote ammoniacal b.h. (mg/kg) | 750 | 270 | 470 | 250 | 310 | 1 020 | 430 | 280 | 370 | 90 | 430 | 10 | 950 | 1 120 | 10 | 240 | 370 |
| Nitrate b.h. (mg/kg) | 10,0 | n.d. | 24,9 | n.d. | n.d. | 1,5 | 7,5 | 437,1 | 255,4 | 240,8 | 8,5 | 11,1 | 3,8 | 15,8 | n.d. | 50,9 | 14,3 |
| Phosphore b.h. (mg/kg) | 57,1 | 65,5 | 54,0 | 4,9 | 79,4 | 30,9 | 54,7 | 138 | 79,5 | 35,1 | 16,7 | 1,98 | 51,9 | 55,3 | 2,5 | 52,1 | 64,2 |
| Potassium b.h. (mg/kg) | 2 089 | 1 459 | 2 178 | 114 | 2 895 | 1 276 | 1 170 | 3 130 | 1 365 | 637 | 1 034 | 24 | 2 633 | 3 760 | 22 | 1 394 | 2 121 |
| DCO (mg $O_2$/L) | 14 738 | 10 944 | 11 150 | 1 945 | 18 240 | 8 031 | 9 375 | 22 656 | 9 197 | 4 992 | 4 031 | 5 262 | 16 299 | 23 701 | 8 031 | 12 096 | 17 433 |
| $DBO_5$ (mg $O_2$/L) | 2 629 | - | - | 146 | - | - | 125 | - | - | - | - | 4 740 | - | - | 7 050 | - | - |
| Coliformes totaux (#/100 mL) | 2,4E6 | - | - | 4,3E4 | - | - | 4,3E5 | - | - | - | - | 1,1E5 | - | - | 2,4E4 | - | - |
| Coliformes fécaux (#/100 mL) | 9,3E5 | - | - | 4,0E3 | - | - | 2,3E5 | - | - | - | - | 2,4E4 | - | - | 9,3E3 | - | - |

Lit absorbant - A : paille d'orge non-haché; - B : sciure de bois; - C : tourbe brune;
Couvert - D : toile semi-perméable géotextile; - E : toile imperméable film de polyéthylène noir
Témoin - F.

### 5.4.5.5 Ferme RA

Les volumes de lixiviats récoltés des plates-formes satellites Est (RA-A couvert) et Ouest (RA-B non couvert) ont été mesurés pour la période du 18 juin au 31 août 1992 (durée de 76 jours). Ces résultats sont présentés à la figure 5.7. Pour fin de comparaison entre les essais au CRIQ sur la plate-forme de béton et les essais à la ferme RA, on peut exprimer le volume de lixiviats produit de deux façons: en mL de lixiviats par kg de fumier (ou L/t.m.) ou en L de lixiviats par $m^2$ de surface d'andain par jour ($L/m^2$-j). Plusieurs facteurs peuvent influencer la quantité de lixiviats récoltée lors des essais à la ferme : hauteur et forme de l'andain, présence ou absence de muret, quantité et intensité des précipitations. La comparaison des volumes de lixiviats produits par les deux satellites doit donc être faite avec beaucoup de prudence.

À la ferme RA, malgré une masse de fumier moindre pour l'andain B non couvert, le volume de lixiviats issu des deux andains est à peu près égal pour 76 jours de suivi (18/06 au 31/08). Pour l'andain B non couvert, le volume de lixiviats est de 189 L/t.m. de fumier et de 159 L/t.m de fumier pour l'andain A couvert pour 76 jours (18 juin au 31 Août). Au CRIQ, le volume de lixiviats récolté des composts sur plate-forme de béton est compris entre 277 (C4) et 613 L/t.m. de fumier (C5) pour une période d'environ 140 jours (23/05 au 14/10). Le dispositif de récolte des lixiviats, les caractéristiques du fumier et des conditions climatiques différentes expliqueraient ces écarts.

Aucune caractérisation des lixiviats produits à la ferme RA n'a été effectuée.

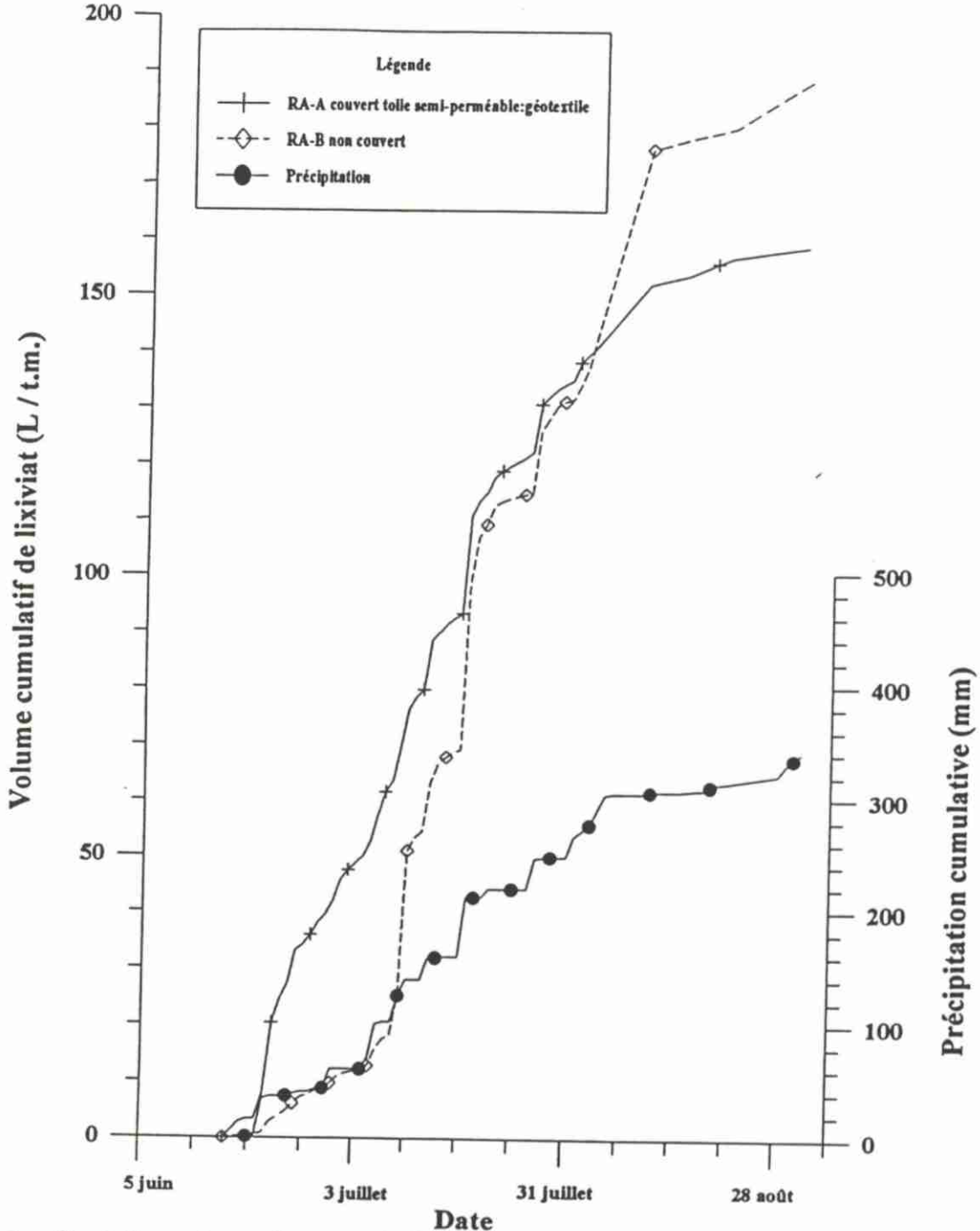



Figure 5.7 : Evolution des volumes de lixiviats et des précipitations en fonction du temps de compostage pour les composts de la ferme RA

### 5.4.5.6 CRIQ

Le fumier utilisé pour les essais de compostage en andain au CRIQ provient de la ferme RA. La TEE du fumier utilisé au CRIQ est cependant plus faible que celle du fumier composté à la ferme RA (79,7 %). Le fumier acheminé au CRIQ a été prélevé dans la partie supérieure de l'amas de fumier à la ferme. La TEE b.h. du fumier au CRIQ était de 75,9 % et celle du compost de 78,9 % à la fin des essais de compostage. La production de lixiviats, tout au cours de la période de compostage (22 mai au 14 octobre 1992), a été observée et mesurée à l'aide d'un lysimètre de 2 $m^2$. Pour ce lysimètre, le risque de colmatage nous apparaît faible en raison de la présence du lit de paille disposé sur le lysimètre recouvert de sable.

Le volume cumulatif de lixiviats issus de l'andain de compost A7 et la précipitation cumulative en fonction du temps de compostage sont présentés à la figure 5.8. Le volume total du lixiviat récolté pour la période complète de compostage par le lysimètre de 2 $m^2$ est de 59,9 L. Comparativement aux autres fermes, le volume de lixiviats prélevé au CRIQ est plus élevé.

Pour absorber la totalité des lixiviats écoulée du compost A7, il aurait fallu utiliser théoriquement un lit de paille d'une épaisseur de 58 cm, ce qui correspond à environ 0,5 kg de paille/u.a.-j. L'épaisseur du lit de paille utilisé pour les essais était de 15 cm.

Les caractéristiques de lixiviats prélevés de l'andain A7 au CRIQ sont présentées au tableau 5.10. Ces lixiviats sont généralement plus concentrés en éléments que ceux analysés sur les autres fermes. Les teneurs en azote total et ammoniacal, la conductivité électrique, la DCO et la $DBO_5$ sont parmi les valeurs les plus élevées mesurées sur les lixiviats originant des sites de compostage visités.

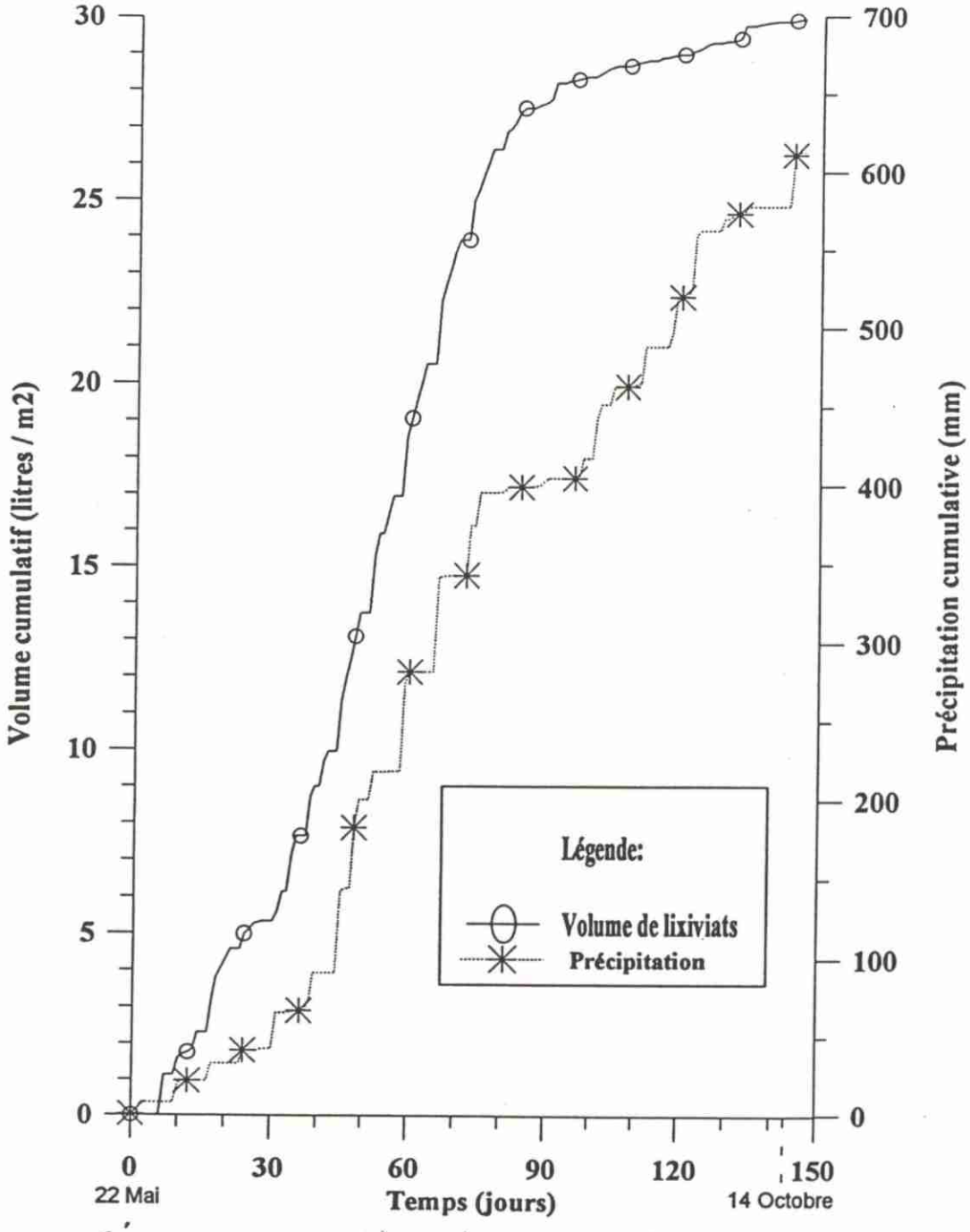



Figure 5.8 : Évolution des volumes de lixiviats et des précipitations en fonction du temps de compostage pour le compost de l'andain A7 du CRIQ

## TABLEAU 5.10 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS ISSUS DE L'ANDAIN DE COMPOST A7 AU CRIQ

| Caractéristique | Date d'échantillonnage | | |
|---|---|---|---|
| | 29/05 | 06/07 | 20/07 |
| Nombre de jours de compostage | 7 | 45 | 59 |
| Volume de lixiviat ($mL/m^2$-j) | 161,4 | 298,7 | 515,0 |
| pH | 7,2 | 7,8 | 8,08 |
| CE (mS/cm) | 18,8 | 22,0 | 27,7 |
| Teneur en eau b.h. (%) | 96,9 | 97,2 | 97,0 |
| Matière en suspension (%) | 0,15 | 0,09 | 0,10 |
| Azote total b.h. (mg/kg) | 1 750 | 2 730 | 3 560 |
| Azote ammoniacal b.h. (mg/kg) | 1 080 | 2 100 | 2 740 |
| Nitrate b.h. (mg/kg) | 59,07 | n.d. | 17,3 |
| Phosphore b.h. (mg/kg) | 82,1 | 95,2 | 94,9 |
| Potassium b.h. (mg/kg) | 2 816 | 4 556 | 5 788 |
| DCO (mg $O_2$/L) | 30 000 | 30 000 | 25 760 |
| $DBO_5$ (mg $O_2$/L) | 19 165 | 15 460 | 10 751 |
| Coliformes totaux (#/100 mL) | 2,3E6 | 1,5E6 | 2,4E6 |
| Coliformes fécaux (#/100 mL) | 4,0E5 | 3,0E5 | 3,0E4 |

### 5.4.5.7 Résumé des analyses de lixiviats

L'ensemble des analyses de lixiviats effectuées sur les 7 sites de compostage (A, B, C, IT, E, RA et CRIQ) sont présentées aux figures 5.9a, 5.9b et 5.9c. L'objectif de ces figures est de montrer les tendances observées et l'étendue des valeurs pour chacun des paramètres à l'étude. Ces analyses comprennent des échantillons pris au cours de la première et de la deuxième année de compostage, soit après un hiver au champ. Sur ces figures, on ne distingue pas la provenance de l'échantillon. Le temps indiqué en jour ne correspond pas à une date d'échantillonnage unique. Le nombre de jour de chacun des échantillons est considéré par rapport au début de chacun des essais respectifs.

Les lixiviats récoltés sur les fermes après un hiver au champ, en deuxième année de compostage, sont en général moins concentrés que les lixiviats de la première année. Par contre, aucune différence marquée n'a été observée pour le pH et la conductivité électrique entre le lixiviat de première année et le lixiviat de deuxième année. Par ailleurs, une baisse plus ou moins marquée pour les autres caractéristiques (NTK, P tot, K tot, DCO, MES) a été observée entre les lixiviats de première année et ceux de la seconde année. Les pertes d'éléments fertilisants par les lixiviats seraient moins importantes en deuxième année que celles obtenues au cours de la première année. Ainsi le potentiel de risques environnementaux serait moindre en seconde année, les éléments fertilisants ayant été perdus dans l'environnement au cours de la première année.

Les caractéristiques des lixiviats mesurées sur les fermes sont différentes des valeurs observées lors des essais sur les plates-formes de béton au CRIQ présentées au chapitre 4. Les lixiviats récoltés au début des essais au temps 0 sur plate-forme étanche sont plus concentrés que les lixiviats récoltés sur les fermes par les lysimètres en sable ou en sol, d'un facteur égal ou supérieur à 2. Une partie des éléments du lixiviats serait retenue par le matériel du lysimètre (sable, sol ou géotextile de protection). Par contre, à la fin des essais au CRIQ (après 140 jours de compostage), les teneurs des lixiviats se rapprochent des teneurs des lixiviats récoltés sur les fermes. Les analyses de DCO et de MES des lixiviats récoltés des plates-formes de béton et des lysimètres de sol sur les fermes tendent à démontrer un impact environnemental des lixiviats plus faible à la ferme surtout en début de compostage. Cela démontre que le sol sous l'andain agirait comme un tampon et qu'après un certain temps, il ne peut plus retenir les éléments du lixiviat.

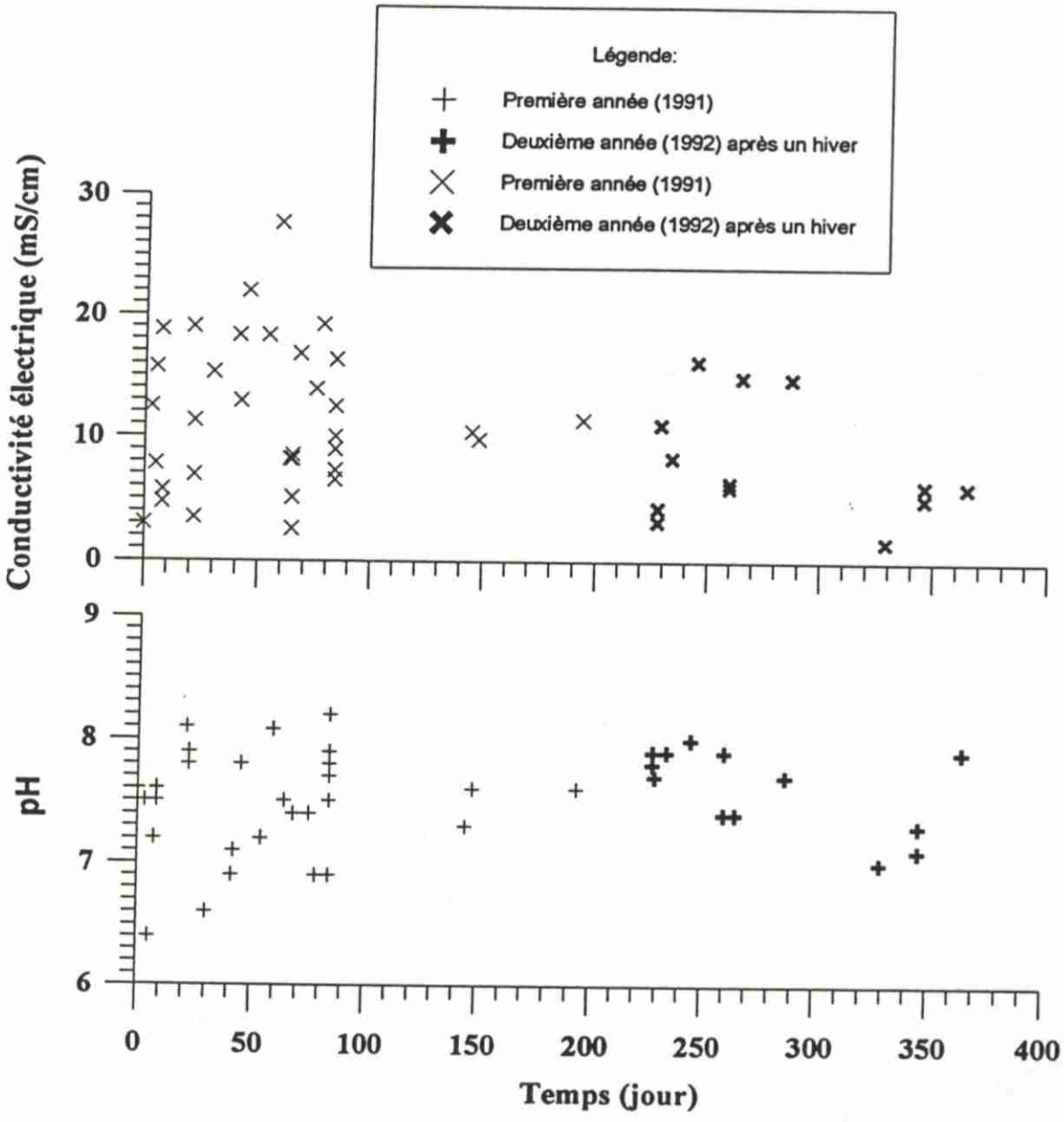



**Figure 5.9a :** Caractéristiques des lixiviats de divers composts en fonction du temps de compostage

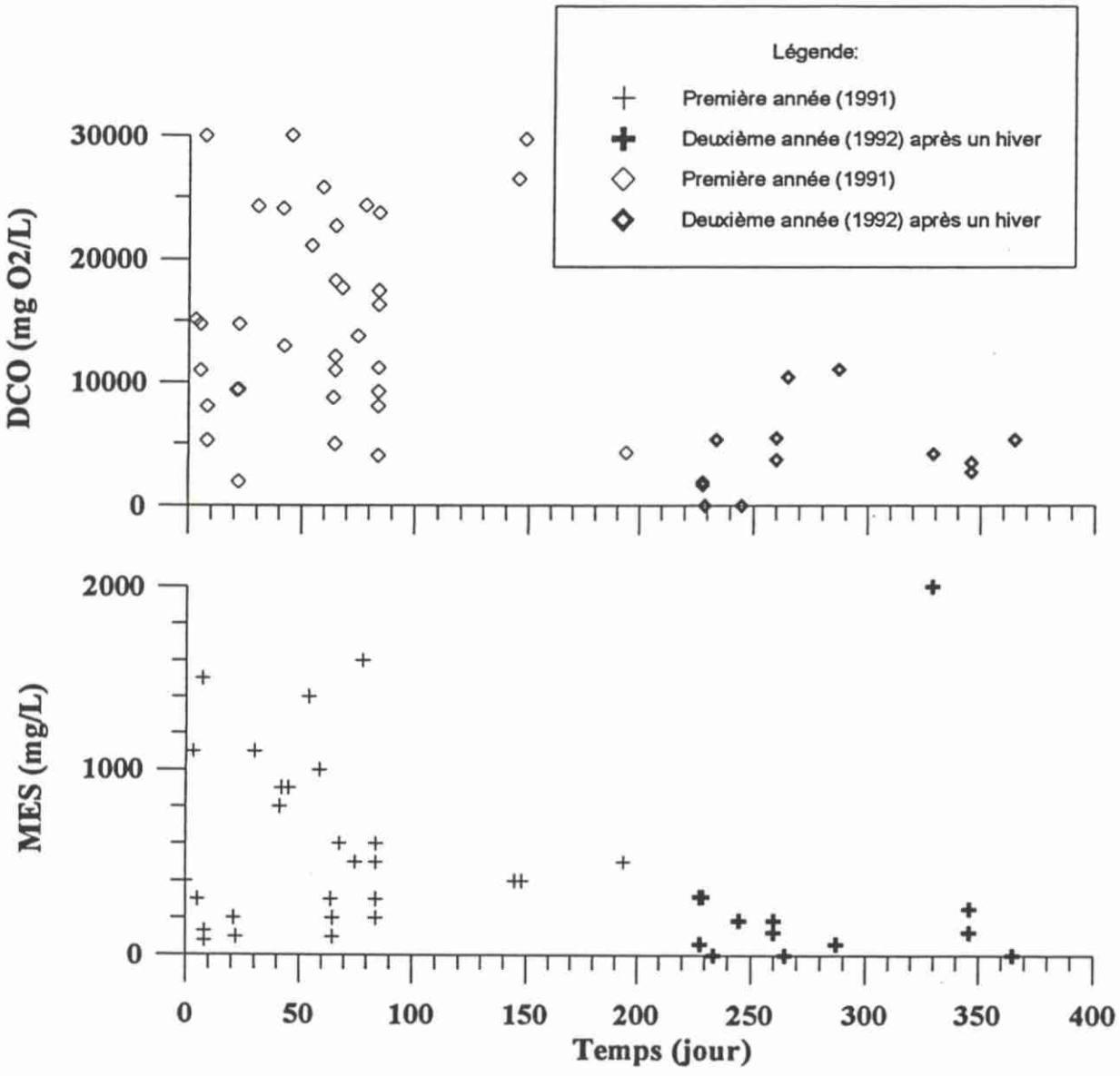



Figure 5.9b : Caractéristiques des lixiviats de divers composts en fonction du temps de compostage

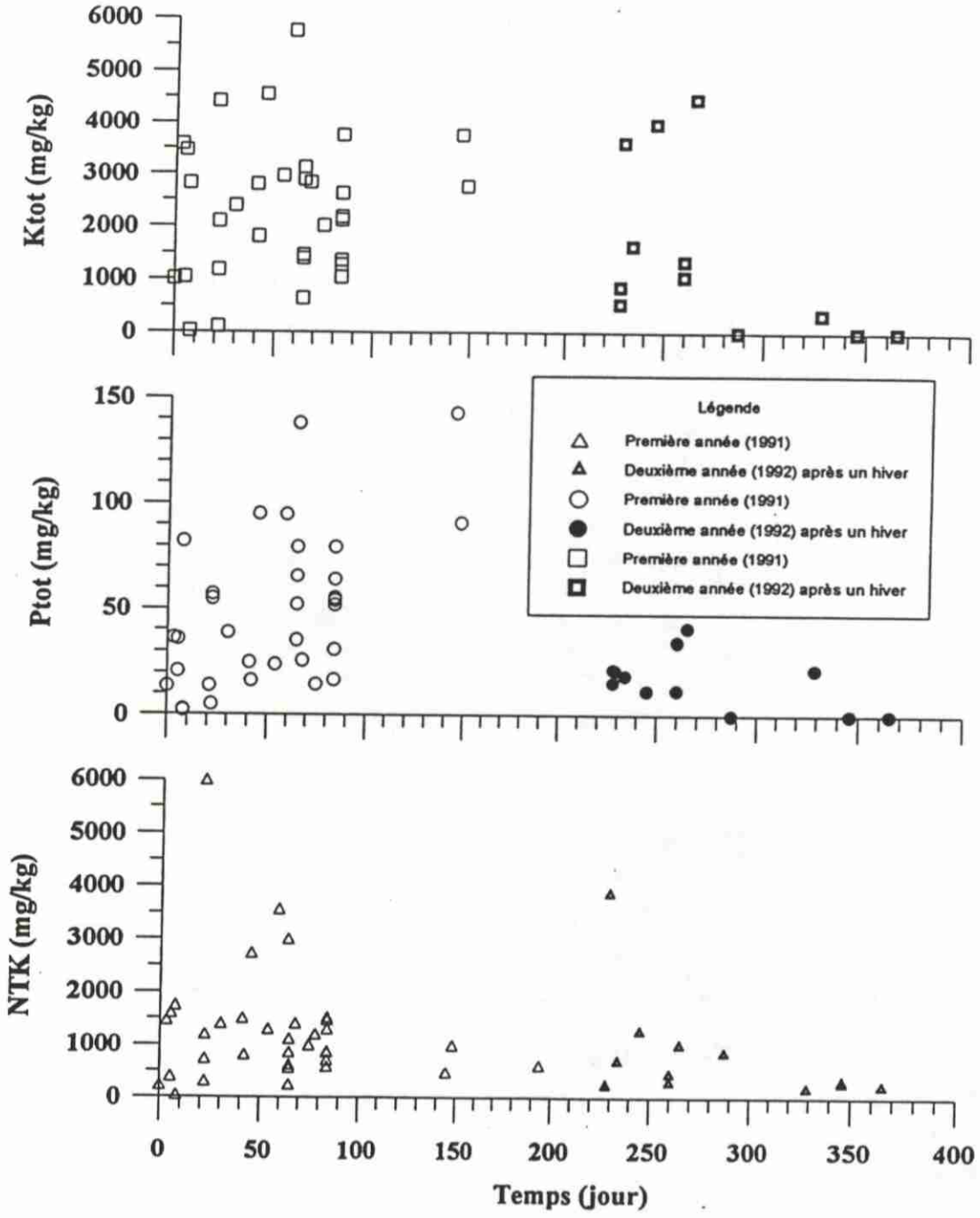



Figure 5.9c : Caractéristiques des lixiviats de divers composts en fonction du temps de compostage

### 5.4.5.8 Comparaisons des volumes de lixiviats récoltés au CRIQ sur plates-formes de béton et à la ferme avec les lysimètres de sol

Cette section présente un résumé des volumes de lixiviats captés par les différents systèmes au CRIQ (plates-formes de béton) et sur les fermes (lysimètres de sol en place ou de sable rapporté). La production de lixiviats est exprimée en L/($m^2$-j) et représente un taux d'émission surfacique de lixiviat "TESL" correspondant au volume de lixiviat récolté par surface d'andain sous le compost et par jour. La comparaison des taux d'émissions surfaciques de lixiviat "TESL" sur les différents sites permet d'établir une relation entre les résultats de la ferme et ceux sur plate-forme de béton.

Il faut rappeler que les systèmes de récolte des lixiviats implantés au CRIQ (plate-forme de béton avec grille centrale perforée) permettent de capter directement sur une surface de 1,7 $m^2$ tous les lixiviats qui normalement s'écouleraient à la surface du sol sous l'andain. Ce système n'occasionne aucune restriction pour l'écoulement du lixiviat, une fois que celui-ci a quitté le compost, contrairement aux lysimètres implantés à la ferme qui eux, en fonction de la perméabilité du sable ou du sol utilisé, occasionne une restriction pour l'écoulement du lixiviat. Deux phénomènes peuvent expliquer les différences de comportement des lysimètres de béton et de sol. Premièrement lorsque la teneur en eau du compost (+ de 70 %) permet de croire qu'il y a encore un écoulement de lixiviat et que le taux d'émission surfacique de lixiviat récolté dans le lysimètre de sol est très faible, on peut penser à un blocage "complet" du lysimètre. Autrement, lorsque le taux d'émission surfacique de deux composts de même composition et comparable, est différent pour des lysimètres de sol et au plate-forme de béton, on peut supposer que la restriction occasionnée par le lysimètre de sol provoque un blocage partielle du lysimètre et favorise la migration et l'écoulement des lixiviats à la surface du sol, vers l'extérieur en périphérie de l'andain.

Le tableau 5.11 présente l'ensemble des TESL obtenues sur les fermes, sur plate-forme de béton. On y retrouve également les TESL obtenues des essais de BIOREX (1994).

TABLEAU 5.11 : RÉSUMÉ DES VOLUMES DE LIXIVIATS PRODUITS LORS DES ESSAIS DE COMPOSTAGE SUR LES FERMES ET SUR PLATE-FORME DE BÉTON

| DESCRIPTION | TEE (%) | | SURFACE DE CAPTAGE ($m^2$) | DURÉE DE LA COLLECTE (jours) | VOLUME DE LIXIVIAT (LITRES) | PRÉCIPITATION (mm) / (mm/j) | TAUX D'ÉMISSION SURFACIQUE ($L/m^2$-j) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | INITIALE | FINALE | | | | | |
| C1; 4,0 kg lit/u.a.-j; andain couvert; 3 retournements; plate-forme de béton; été 92 | 82,6 | 74,6 | ≈ 14 | 138 | 454 | 0 / 0 | 0,2 |
| C2; 2,8 kg lit/u.a.-j; andain couvert; 2 retournements; plate-forme de béton; fumier pré-essoré à une TEE de 76 %; été 92 | 76,0 | 69,2 | ≈ 14 | 97 | 218 | 0 / 0 | 0,2 |
| C3; 2,0 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; 3 retournements; plate-forme de béton; été 92 | 73,9 | 78,9 | 14,1 | 140 | 4083 | 605,9 / 4,3 | 2,1 |
| C4; 6,4 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; 3 retournements; plate-forme de béton; été 92 | 79,1 | 79,3 | 13,5 | 144 | 2197 | 613,5 / 4,3 | 1,1 |
| C5; 6,4 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; non retourné (statique); plate-forme de béton; été 92 | 77,5 | 79,5 | 13,9 | 144 | 3717 | 613,5 / 4,3 | 1,9 |
| C6; 4,0 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; 3 retournements; plate-forme de béton; été 92 | 81,2 | 82,4 | 11,5 | 138 | 3923 | 605,9 / 4,4 | 2,5 |
| A7; 3,0 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; 2 retournements; lysimètres de sable; lit de paille de 15 cm; été 92 | 75,9 | 78,9 | 2,0 | 80: jour 0 à 80<br>65: jour 80 à 145 | 53,0<br>6,9 | 400 / 5,0<br>213 / 3,3 | 0,3<br>0,05 |
| Ferme E-A; 5,7 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; lysimètre de sable; 3 retournements; lit de paille 15 cm; été 92 | 73,7 | 74,1 | 2,0 | 20: jour 0 à 20<br>62: jour 20 à 82 | 8,0<br>5,4 | 65 / 3,3<br>352 / 5,7 | 0,2<br>0,044 |
| Ferme E-B; 5,7 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; lysimètre de sable; 3 retournements; lit de sciure de bois 2,5 cm; été 92 | 73,7 | 74,1 | 2,0 | 20: jour 0 à 20<br>62: jour 20 à 82 | 3,0<br>7,4 | 65 / 3,3<br>352 / 5,7 | 0,075<br>0,06 |
| Ferme E-C; 5,7 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; lysimètre de sable; 3 retournements; lit de tourbe brune 2,5 cm; été 92 | 73,7 | 74,1 | 2,0 | 20: jour 0 à 20<br>62: jour 20 à 82 | 1,36<br>3,0 | 65 / 3,3<br>352 / 5,7 | 0,034<br>0,024 |
| Ferme E-D; 5,7 kg lit/u.a.-j; andain couvert de toile géotextile semi perméable; lysimètre de sable; 3 retournements; été 92 | 73,7 | 64,3 | 2,0 | 20: jour 0 à 20<br>62: jour 20 à 82 | 5,7<br>2,5 | 65 / 3,3<br>352 / 5,7 | 0,14<br>0,02 |
| Ferme E-E; 5,7 kg lit/u.a.-j; andain couvert de toile imperméable de polyéthylène noire; lysimètre de sable; 3 retournements; été 92 | 73,7 | 73,1 | 2,0 | 20: jour 0 à 20<br>62: jour 20 à 82 | 21,7<br>1,77 | 65 / 3,3<br>352 / 5,7 | 0,5<br>0,014 |
| Ferme E-F; 5,7 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; lysimètre de sable; 3 retournements; témoin; été 92 | 73,7 | 74,1 | 2,0 | 20: jour 0 à 20<br>62: jour 20 à 82 | 19,3<br>2,5 | 65 / 3,3<br>352 / 5,7 | 0,48<br>0,02 |
| Ferme IT-E; 5,0 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; 2 retournements; lysimètre d'argile en place; été 92 | ? | 72,7 | 2,0 | 5: jour 0 à 5<br>59: jour 5 à 64 | 0,74<br>0,47 | 14,6 / 2,9<br>120,6 / 2,0 | 0,074<br>0,004 |
| Ferme B; 4,0 kg lit/u.a.-j; andain couvert polyéthylène noire; 1 retournement; lysimètre de sol et gazon en place | 84,8 | 83,2 | 1,5 | 6: jour 24 à 30 | 0,909 | 42,5 / 7,1 | 0,101 |
| Ferme B; 4,0 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; 1 retournement; lysimètre de sol et gazon en place | 84,8 | 82,5 | 1,5 | 42: jour 0 à 42 | 1,8 | 122,7 / 2,9 | 0,029 |
| Ferme C; 6,5 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; non retourné; lysimètre de sol sablonneux | 73,8 | 68,5 | 2,0 | 3: lysimètre 1<br>5: lysimètre 2 | 1,1<br>0,8 | 24,0 / 8,0<br>2,5 / 0,5 | 0,178<br>0,08 |
| BIOREX; ferme A; 5 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; 1 ou sans retournement; lysimètre de gravier; moyenne de 3 andains | 70,3 | 65,8 | 60,8 | 117 | 8 400 | 574,3 / 4,9 | 1,2 |
| BIOREX; ferme B; 4 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; 2 retournements; lysimètre de gravier | 74,6 | 70,6 | 150,3 | 133 | 60 800 | 624,8 / 4,7 | 3,0 |
| BIOREX; ferme B; 4 kg lit/u.a.-j; andain non couvert; 4 retournements; lysimètre de gravier | 77,8 | 71,7 | 113,6 | 133 | 35 000 | 624,8 / 4,7 | 2,3 |

Plusieurs observations se dégagent du tableau 5.11. De façon générale les taux d'émissions surfaciques de lixiviats sont beaucoup plus faibles à la ferme avec les lysimètres en sol qu'avec ceux des plates-formes de béton du CRIQ. Dans la plupart des cas, ces différences ne s'expliquent pas par un écoulement moindre des composts à la ferme, mais plutôt par une restriction plus grande occasionnée par les lysimètres. En effet, le lixiviat qui s'écoule à la surface des plates formes de béton est immédiatement cannalisé dans les bassins de mesures des volumes.

Quant aux résultats de BIOREX (1994), les taux d'émissions surfaciques sont similaires ou même supérieurs aux TESL des plates-formes du CRIQ. Même si l'humidité de départ du fumier à la ferme B (BIOREX) était en générale plus faible que ceux du CRIQ, leurs plus grandes valeurs s'expliquent par des précipitations plus importantes pour des essais plus courts et par des andains plus large (plus évasés) à la ferme B qu'au CRIQ. En effet, il y a eu moins de précipitations au CRIQ (610 mm en 140 jours au CRIQ vs 624 mm en 133 jours à la ferme B) surtout en fin de compostage et les andains était plus large à la ferme B (BIOREX, 1994) comparativement aux andains du CRIQ (1,3 m de haut x 5 m de large à la ferme B de BIOREX vs 1,5 m de haut x 4 m de large: au début des essais de compostage au CRIQ);

Les taux d'émissions surfaciques des composts couverts (0,2 L/m$^2$-j) sont de 5 à 10 fois plus faibles que ceux des composts non couverts (1 à 2 L/m$^2$-j) sur les plates-formes du CRIQ. Cette observation permet de constater le rôle des précipitations pour la prédiction des volumes de lixiviat qui s'écoulerait d'un andain de compost au champs. A la ferme E l'utilisation d'une toile de polyéthylène sur l'andain n'a pas permis de constater une diminution du volume de lixiviat. En effet aux sections E (couvert polyéthylène noire) et F (témoin), le TESL est équivalent (0,5 L/m$^2$-j pour les 20 premiers jours et 0,017 L/m$^2$-j pour les 62 derniers jours. Ces résultats tendent à démontrer que la toile imperméable de polyéthylène noire ne permet pas l'évaporation de l'eau du compost contrairement à l'andain témoin. Ce dernier permet une certaine évaporation, mais est, en contrepartie, humidifié par la pluie. Par contre l'utilisation de la toile de géotextile semi-perméable permet en général de protéger l'andain de compost des précipitations de façon suffisante, tout en permettant l'évaporation de l'eau et un plus faible égouttement du fumier suite à sa mise en andain. Ceci est démontré par un plus faible taux d'émission surfacique de lixiviat de la section D (couvert du géotextile) de 0,14 L/m$^2$-j pour les 20 premiers jours comparativement au témoin et à la toile de polyéthylène.

Le tableau 5.11 permet aussi de constater une diminution importante dans le temps du volume de lixiviats capter par le lysimètre pour l'andain A7 du CRIQ. Un taux d'émission surfacique de lixiviat de 0,3 L/m$^2$-j a été mesuré au cours des 80 premiers

jours de compostage, tandis qu'à la fin (jour 80 à 145) un TESL de 0,05 L/m²-j a été mesuré. D'autres essais ont permis de constater un phénomène similaire soit ceux des sections A, D, E et F de la ferme E. L'écoulement d'un volume plus faible de lixiviat à la fin du compostage peut s'expliquer de deux façons: 1) par une plus grande capacité d'absorption du compost que du fumier, donc moins de lixiviat qui s'écouleraient du compost que du fumier, 2) la tendance du lysimètre à se colmater à la fin des essais; plus il passe de lixiviat dans le lysimètre, plus celui-ci risque de ce bloquer. Les essais ne nous permettent pas de déterminer lequel des deux phénomènes est prédominant en fin de compostage.

Les résultats des TESL à la section A de la ferme E (lit de paille) et ceux de l'andain A7 (avec lit de paille) au CRIQ sont similaires. L'écoulement le plus important s'effectue en début de compostage. Étant donné la plus faible humidité du fumier de la ferme E et sa composition différente (fumier de bovins de boucherie vs fumier de vaches laitières), la diminution de l'écoulement de lixiviats du compost à la ferme E s'est produit plus rapidement qu'à l'andain A7. Après 20 jours de compostage à la ferme E et après 80 jours de compostage à l'andain A7, on constate une diminution importante du volume de lixiviats écoulé, même si les précipitations sont encore importantes.

L'utilisation de lits absorbants de sciure de bois et de tourbe à la base des andains de compost permet de diminuer de façon importante l'écoulement de lixiviats dans le sol en début de compostage contrairement au lit de paille qui absorbe moins bien ces lixiviats. En effet des taux d'émissions surfaciques de lixiviats de 3 et 6 fois inférieurs à celui mesuré pour le lit de paille ont été mesurés pour respectivement le lit de sciure de bois et de tourbe brune pour les 20 premiers jours de compostage. La sciure de bois et la tourbe brune protègeraient mieux le sol que la paille contre l'écoulement de lixiviats. A ce titre des essais comparatifs sur plate-forme de béton avec ces deux matériaux seraient importants à réaliser pour connaître de façon précise les performances de ces matériaux.

Pour les essais à la ferme IT, la probabilité de l'effet de colmatage du lysimètre est plus élevée qu'aux autres fermes puisque le sol utilisé pour le lysimètre était un sol argileux. Le taux d'émission surfacique de lixiviat est très faible (inférieur à 0,1 l/m²-j).

La charge en potassium du lixiviat qui s'écoule du compost dans le sol a été calculée pour l'andain A7 du CRIQ afin de vérifier si le calcul des pertes par l'approche bilan est égal au calcul des pertes par les lixiviats et pour vérifier l'ampleur des différences entre les essais au champs et sur plate-forme. Ces calculs ont été faits pour le potassium en raison de son caractère facilement lessivable et de l'absence de perte

par volatilisation en cours de compostage. Les calculs de charges de potassium ont été faits en tenant compte de la surface de l'andain, du volume de lixiviats récolté dans les lysimètres après 140 jours de compostage et de la teneur moyenne en potassium du lixiviat. Le résultat de ces calculs montrent que la valeur des pertes en potassium dans le lixiviat est d'environ 13 fois plus faible que la valeur calculée par l'approche bilan. Par ailleurs, les pertes de potassium calculées par l'approche bilan de l'andain A7 sont équivalentes aux pertes constatées pour les piles C3 à C6 sur plate-forme de béton. De plus, le volume de lixiviats récolté dans le lysimètre A7 est beaucoup plus faible que celui capté par la grille centrale des plates-formes de béton étanches. Il y a donc un écoulement réduit de lixiviat par l'utilisation du lysimètre de sable par rapport à la grille de métal perforée. La valeur des pertes en potassium ne peut être calculés par la charge cumulée des lixiviats pour les andains sur le sol avec un lysimètre en sable, cette méthode n'est pas assez précice. L'approche bilan serait plus précise, surtout si il n'y a pas trop de sol d'incorporer au compost lors des retournements.

Un sol colmaté sous l'andain peut permettre de retenir temporairement le lixiviat, mais le risque d'écoulement du lixiviat dans le sol est permanent et doit être envisagé en fonction des résultats des essais sur plate-forme de béton étanche. En effet, le sol sous l'andain peut être déplacé et remanié par les équipements qui servent pour les retournements du compost ce qui se traduit par un décolmatage de la surface du sol et un risque d'écoulement de lixiviat dans le sol. Il doit y avoir un colmatage du sol uniforme sous l'andain sinon le lixiviat s'écoulera au travers du sol perméable.

### 5.4.6 SOLS

Au cours des visites réalisées aux différents sites de compostage, des échantillons de sols ont été prélevés pour analyses. Certains échantillons ont été prélevés à proximité des sites de compostage à la surface du sol dans les 15 premiers cm où il n'y avait pas de compost (sol témoin). La durée de compostage pendant laquelle ces échantillons de sols ont été prélevés sous les andains de compost, varie entre 25 et 156 jours. Les analyses de Ntot, P, K, Ca et Mg par la méthode Melhich III sont présentées au tableau 5.11.

Le sol témoin du CRIQ correspond à une terre de surface achetée et transportée sur le site expérimental. Les valeurs initiales en éléments fertilisants sont faibles ce qui permet de quantifier les augmentations attribuables au lessivage obtenu lors du compostage du fumier en andains après une saison de production. Sur les autres sites, on remarquera que les sols témoins ont des teneurs en éléments fertilisants très variables ce qui réflèle la spécificité de chaque site.

Lors des essais de compostage, le sol témoin de la ferme A se retrouvait sous une prairie. Il est possible que l'emplacement où ont été prélevés les échantillons ait servi de site de compostage au cours des années précédentes. A la ferme B, le sol témoin correspond au sol prélevé sur une planche de terre cultivée (fourrage) séparée du site de compostage par un petit fossé de surface. Le sol témoin du site C est localisé sur une aire de compostage. Bien que les échantillons de sols ont été prélevés entre les andains, il est possible que le sol ait été recouvert de compost au cours de l'année précédente ce qui explique les valeurs élevées du sol témoin.

Par rapport à l'analyse du sol témoin, on observera sur les divers sites, une hausse ou une baisse de ces éléments contenus dans le sol situé sous l'andain de compost. Pour l'ensemble des sites et d'une façon générale, on observe une élévation du pH et de la conductivité électrique des sols sous les andains en comparaison avec les sols témoins. La valeur maximale mesurée dans les sols atteint 7,8 pour le pH et 3,05 mS/cm pour la conductivité électrique.

Pour l'azote total, on observe une faible hausse de teneurs dans les sols situés sous les andains. La hausse maximale est de 211 % (CRIQ) et la teneur maximale dans le sol atteint 0,56 % de la masse sèche (CRIQ) ce qui correspond à 12,5 t de Ntot par hectare.

De façon générale, le phosphore (MIII) augmente dans les sols qui ont été recouverts de composts sur une période de quelques mois comparativement aux valeurs initiales.

À la ferme A, la teneur maximale de P dans le sol sous l'andain atteint 840 kg/ha alors qu'elle est inférieure à 350 kg/ha sur les autres sites de compostage. Selon les grilles de référence en fertilisation du CPVQ (1994), un sol destiné aux grandes cultures, aux prairies et aux pâturages est jugé excessivement riche en P lorsque la teneur dans le sol excède 251 kg P/ha.

Au CRIQ, le sol en place est passé de pauvre (14 kg/ha) à riche (249 kg/ha) en P après un temps de compostage de 145 jours ce qui représente une augmentation de la teneur en P de 1 679 %.

Comparativement au phosphore, l'augmentation du potassium dans tous les sols suite au compostage est beaucoup plus importante. Sur les fermes, les teneurs en K (MIII) dans les sols recouverts de compost pendant quelques mois de compostage sont supérieures à 3 000 kg de K/ha. Ces résultats confirment que le phénomène de lessivage sous l'andain est important pour cet élément. La teneur maximale en K dans le sol a atteint 6 675 kg/ha à la ferme A après 156 jours de compostage alors que le sol témoin en contenait 910 kg/ha. Sur les autres sites, l'augmentation de la teneur en K dans les sols recouverts de compost a été de 332 % (ferme A), 217 % (ferme C) et 40 % (ferme B). Les pluies automnales et printanières ainsi que la fonte des neiges entraineront un lessivage de cet élément dans le sol ce qui se traduira par une réduction de la teneur en K dans le sol pour la saison de croissance suivante. Un tel suivi n'a pas été effectué lors des essais.

Selon les grilles de référence en fertilisation du CPVQ (1994), un sol destiné aux grandes cultures, aux prairies et aux pâturages est jugé excessivement riche en K lorsque la teneur dans le sol excède 501 kg K/ha.

Au CRIQ, la teneur en K dans le sol en place est passée de moyen (186 kg/ha) à excessivement riche (5 354 kg/ha) après un temps de compostage de 145 jours ce qui représente une augmentation de la teneur en K de 2 778 %. La teneur finale en K dans le sol sous l'andain est 10 fois supérieure à une valeur jugée excessivement riche.

Selon les sites, la teneur en calcium augmente ou demeure semblable dans les sols sous les andains. Dans le cas des augmentations de teneurs en Ca, elles se situent entre 12 et 72 %. La teneur maximale dans le sol atteint 6 245 kg/ha (CRIQ).

## TABLEAU 5.12 : CARACTÉRISTIQUES DES SOLS SOUS LES ANDAINS DE COMPOST

| Caractéristique | Ferme | A | | | | | | | C | | | B | | | CR | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Témoin | A | | C | | D | | Témoin | E | A | Témoin | B [1] | A | Témoin | A |
| Durée du compostage (jours) | | - | 79 | 156 | 79 | 156 | 13 | 88 | - | 75 | 300 | - | 25 | 25 | - | 145 |
| Date d'échantillonnage | | - | 28/08 | 13/11 | 28/08 | 13/11 | 28/08 | 13/11 | - | 08/08 | 10/11 | 09/10 | 09/10 | 09/10 | 22/05 | 14/10 |
| pH | | 5,1 | 7,2 | 6,9 | 6,9 | 7,2 | 5,3 | 6,7 | 6,6 | 7,7 | 7,8 | 6,0 | 6,6 | 5,7 | 6,3 | 7,6 |
| CE (mmho/cm) (dilution 1:2) | | 0,2 | - | 1,8 | - | 1,5 | - | 1,3 | 0,3 | 1,2 | 1,4 | 0,3 | 1,1 | 1,8 | 0,11 | 3,05 |
| Matière organique b.s. (%) | | 4,5 | 4,8 | 2,9 | 4,8 | 5,1 | 4,7 | 5,3 | 2,9 | 3,7 | 4,3 | 6,9 | 5,2 | 7,0 | 1,8 | 17,0 |
| Azote total (g/100 g) séché à l'air | | 0,29 | 0,34 | 0,30 | 0,36 | 0,34 | 0,34 | 0,34 | 0,14 | 0,20 | 0,22 | 0,40 | 0,34 | 0,44 | 0,18 | 0,56 |
| Phosphore MIII (kg/ha) | | 771 | 473 | 807 | 446 | 840 | 505 | 728 | 103 | 102 | 238 | 305 | 73 | 346 | 14 | 249 |
| Potassium MIII (kg/ha) | | 910 | 4 592 | 6 675 | 4 413 | 5 578 | 2 195 | 4 323 | 1 368 | 3 875 | 4 803 | 1 924 | 2 442 | 2 939 | 186 | 5 354 |
| Calcium MIII (kg/ha) | | 1 564 | 1 756 | 1 572 | 1 438 | 1 817 | 1 510 | 1 548 | 963 | 1 465 | 2 146 | 3 288 | 2 327 | 3 515 | 3 633 | 6 245 |
| Magnésium MIII (kg/ha) | | 135 | 349 | 379 | 381 | 452 | 242 | 262 | 145 | 318 | 661 | 683 | 504 | 818 | 181 | 444 |

1) À la ferme B, la section B n'était pas encore couverte d'une toile imperméable lors de l'échantillonnage du sol B.
- Échantillon A témoin : moyenne de 2 échantillons (28/08 et 13/11).
- Échantillon C témoin : moyenne de 2 échantillons (08/08 et 11/10).

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

Après le potassium, le magnésium est l'élément qui augmente le plus dans les sols sous les andains. Pour l'ensemble des sites, la hausse moyenne pour le Mg est de 140 %. La teneur maximale de Mg dans les sols sous les andains atteint 818 kg/ha à la ferme B alors que le sol témoin était riche (683 kg de Mg par hectare). La teneur de Mg dans le sol est jugée très riche lorsque la valeur excède 796 kg/ha (Fournier, 1995).

Si on exclut le site du CRIQ sur lequel on retrouve du sol «vierge» non cultivé, la hausse moyenne des teneurs en éléments fertilisants des sols recouverts de compost sur les fermes visitées, a été de 250 % pour K, 140 % pour Mg, 20 % pour N tot et 14 % pour Ca. Pour le phosphore, l'augmentation de la teneur dans les sols sous les andains est peu importante. A l'exception du site de compostage en sol du CRIQ dont la valeur initiale en P (MIII) était très faible.

## 5.5 TECHNIQUES D'OPTIMISATION DU COMPOSTAGE À LA FERME

Le choix d'une ou des techniques de réduction du volume de lixiviat doit se faire en regard des caractéristiques du fumier à composter et en regard des objectifs poursuivis. Le volume de lixiviat qui s'écoule du compost à l'environnement est fonction de trois phénomènes. Premièrement, un drainage naturel du lixiviat du compost se produit lors de la mise en andain. Cet écoulement de liquide en début de compostage est fonction notamment de la teneur en eau du compost et des caractéristiques absorbantes de la litière dans le fumier. Ce phénomène est généralement plus important au début du compostage. Deuxièmement, le volume et l'intensité des précipitations qui tombent sur l'andain de compost influence plus ou moins directement le volume de lixiviat qui s'écoule dans le sol. Troisièmement, le volume de lixiviat et la quantité d'éléments fertilisants perdus dans le sol par le compost sont aussi influencés par la perméabilité du sol ou par les caractéristiques des matériaux absorbants déposés en lits à la base des andains de compost.

Comme on peut le voir, deux techniques sont possibles lors du compostage des fumiers en andains au champ pour réduire de façon certaine le volume de lixiviat qui s'écoule du compost dans le sol.

1) Le recouvrement du compost pour diminuer le volume des précipitations reçues à la surface de l'andain et la teneur en eau du compost.

2) L'ajout d'un matériel absorbant à la base de l'andain pour absorber les lixiviats qui s'écoulent du compost par drainage naturel.

### 5.5.1 EFFETS DU RECOUVREMENT

L'effet du recouvrement des andains de compost sur la production de lixiviats, sur le déroulement des processus de compostage et sur les caractéristiques du compost produit a été examiné. Le recouvrement des andains de compost a été fait avec deux types de toile :

- toile imperméable (film de polyéthylène noir);
- toile semi-perméable (géotextile compostex 200 de Texel inc.).

La toile imperméable a été mise à l'essai sur les sites de compostage IT, B et E. La toile semi-perméable a été mise à l'essai sur les sites de compostage CRIQ, RA et E.

L'utilisation comparative de la toile semi-perméable, de la toile imperméable et des composts non couverts a permis de dégager certaines tendances pour les facteurs suivants : température et teneur en oxygène du compost, évolution des TEE, des teneurs en éléments fertilisants, des pH et des conductivités électriques, des pertes de masses, de volumes et des impacts environnementaux concernant les caractéristiques des lixiviats et les caractéristiques des sols.

#### 5.5.1.1 Température, $O_2$ et déroulement des processus de compostage

À la ferme E, les températures du compost sous la toile semi-perméable ont été en moyenne supérieures à celles du compost non couvert (5 °C) et du compost couvert de la toile imperméable (10 °C). Des résultats similaires ont été obtenus à la ferme RA.

La comparaison de la teneur en oxygène d'un compost couvert d'une toile de polyéthylène noire et d'un compost non couvert tend à démontrer que le compost couvert souffre d'une moins bonne aération. À la ferme B par exemple, la teneur moyenne en $O_2$ du compost non couvert était de 12,3 % alors qu'elle était de 2,4 % pour le compost couvert d'un polyéthylène et ce, après 60 jours de compostage.

L'utilisation de la toile imperméable durant la phase active, n'apparaît pas avantageuse du point de vue du procédé de compostage puisque l'aération du compost ne s'effectue que lors des retournements.

#### 5.5.1.2 Pertes de masse et de volume

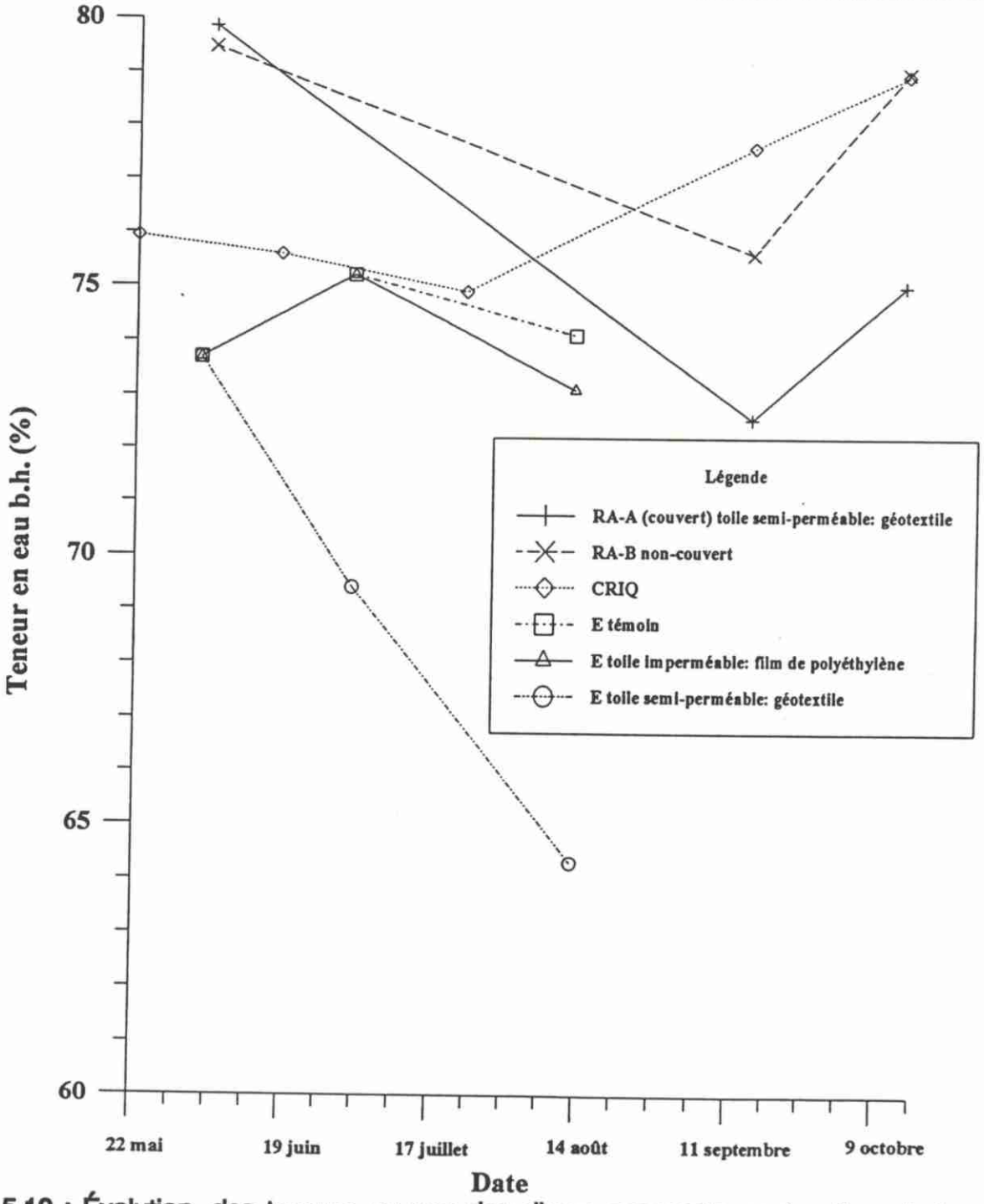
Une réduction plus importante de la masse et du volume a été observée à la ferme RA en faveur du compost couvert d'une membrane géotextile comparativement au compost non couvert. Le compost couvert serait mieux aéré et il y aurait une plus grande quantité d'eau évaporée du compost couvert d'un géotextile que l'andain qui ne l'est pas.

### 5.5.1.3 Évolution des TEE en cours de compostage

L'intérêt pratique de suivre l'évolution de la teneur en eau du compost est lié à des décisions portant sur le choix de la ou des techniques de réduction de lixiviat. En effet, la teneur en eau du compost et le volume de lixiviat qui s'écoule des andains de compost sont intimement liés comme nous l'avons vu au chapitre 4.

Les deux essais de compostage incluant le recouvrement des composts à l'aide de la toile semi-perméable (fermes E et RA) ont entraîné une diminution de la TEE du compost. La figure 5.10 présente un résumé de l'évolution des TEE des composts pour l'ensemble des essais. Pour les mêmes composts non couverts, la TEE des composts n'a pas diminué. La même tendance est obtenue avec la toile imperméable (film de polyéthylène) à la ferme E alors que la TEE du compost couvert est demeurée constante en cours de compostage. À la ferme B, la TEE du compost couvert et non couvert, après 60 jours de compostage en andain, à toute fin pratique, ne montre pas de différence (TEE = 83,2 % couvert et TEE = 82,5 % non couvert).

À la ferme IT, l'analyse d'un compost couvert d'une toile imperméable et d'un compost non couvert d'origine et de formulation identiques révèle une TEE plus faible pour le compost couvert. Ces deux composts étaient en andain depuis plus de 300 jours et ont subi l'action du gel/dégel de l'hiver et du printemps. Nous croyons que cette action combinée favorise une réduction de la TEE des composts couverts ou non couverts au printemps suivant.




5.10 : Évolution des teneurs en eau des divers composts en fonction du temps de compostage

À la lumière de ces informations, l'utilisation d'une toile semi-perméable pour le recouvrement du compost lors de la phase active de compostage serait préférable à celle d'une toile imperméable. Lorsque la phase du compostage est terminée, les deux types de toile pourraient être utilisés de façon avantageuse.

#### 5.5.1.4 Évolution des teneurs en éléments fertilisants des composts en cours de compostage

L'évolution des teneurs en azote, phosphore et potassium des composts aux fermes E et RA ainsi que celle au site de compostage du CRIQ est présentée à la figure 5.11.

Potassium

Les essais de compostage avec recouvrement du compost à l'aide d'une toile semi-perméable réalisés à la ferme E, ont permis de constater une augmentation de la teneur en potassium entre le fumier et le fumier composté. La teneur en K du compost couvert d'une toile semi-perméable est supérieure à celle du compost couvert d'une toile imperméable. Le recouvrement de l'andain avec la toile semi-perméable permettrait de diminuer les pertes de K par lessivage en abaissant de façon importante la TEE du compost.

À la ferme B, un compost légèrement plus concentré en potassium a été obtenu avec l'andain couvert de la toile imperméable et ce, pour un temps de compostage de 60 jours en comparaison du fumier de départ. Nous avons également obtenu une conductivité électrique plus élevée avec le compost couvert (tableau 5.5) qui traduirait un lessivage moins important.

A la ferme RA, la différence de teneur en K du compost augmente en cours de compostage pendant les 4 premiers mois. Au cours du 5e mois, cette différence demeure constante. La toile géotextile a entraîné des teneurs plus élevées en K dans le compost comparativement au témoin. Les volumes de lixiviats ne sont disponibles que pour les dix premières semaines de compostage. Après cette période, il est possible que la quantité de lixiviat produit par le compost non couvert ait été plus importante que le compost couvert.

## Azote

Aucun lien ne peut être établi entre la teneur en azote des composts en cours de compostage et l'utilisation de toiles pour le recouvrement du compost. L'augmentation ou la diminution de la teneur en azote dans les composts n'apparaît pas liée à cette pratique. Bien que le compost couvert d'une géomembrane (ferme RA) ait une teneur en N supérieure au compost non couvert.

## Phosphore

En général, on remarque une légère augmentation de la teneur en phosphore des composts dans le temps et ce, peu importe le type de recouvrement. La seule exception a été obtenue pour le compost non couvert de la ferme RA.

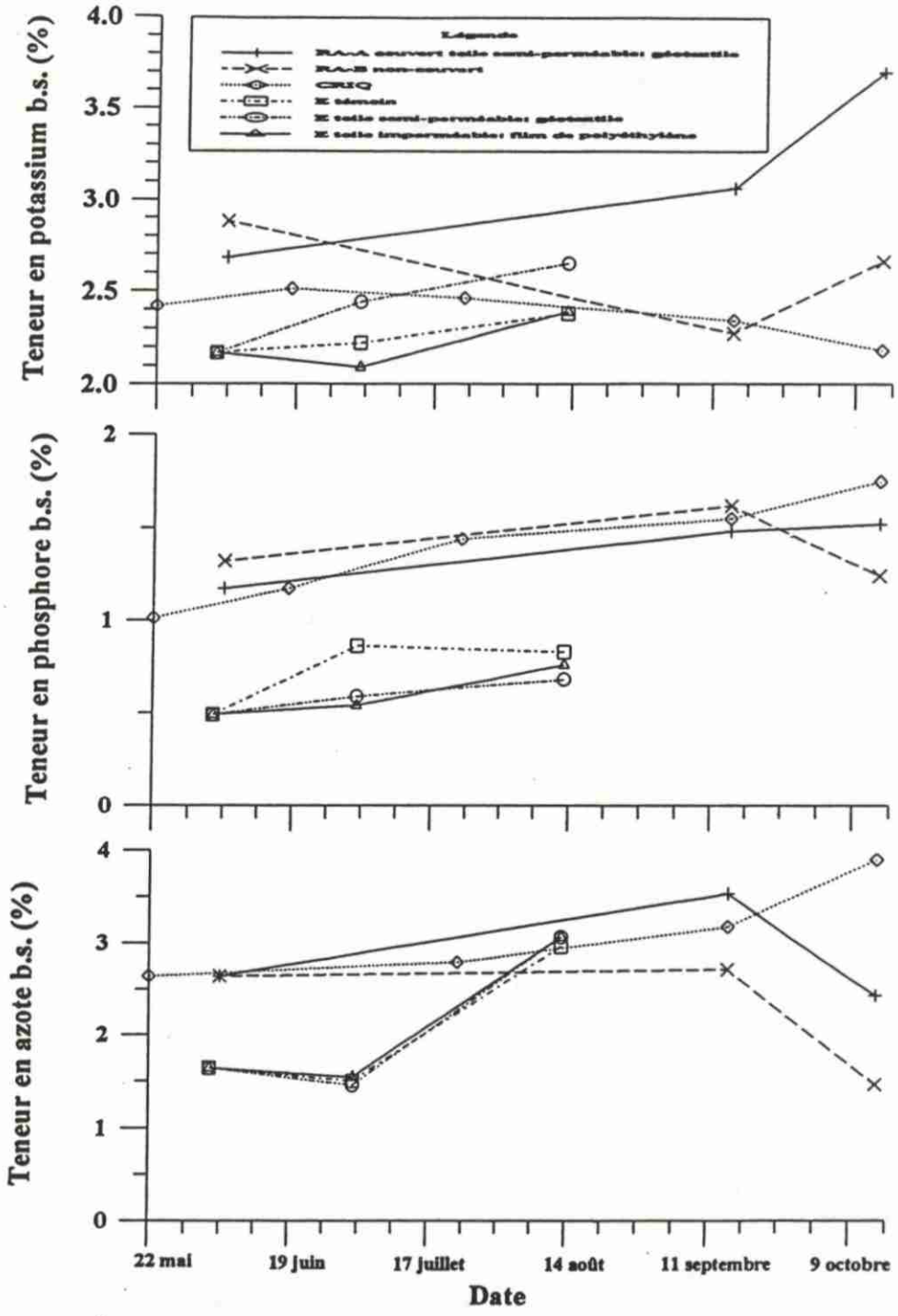



**Figure 5.11 : Évolution des caractéristiques des composts pour divers traitements**

### 5.5.1.5 Volume de lixiviats

Le volume de lixiviats écoulé des composts et récolté dans les lysimètres est fonction de plusieurs variables. Le blocage partiel ou complet des lysimètres et les fuites de lixiviats ont pu se produire dans certains cas. De plus, la pente du terrain et les dépressions locales des terrains ont pu influencer les valeurs obtenues. Finalement, les teneurs en eau du compost et les précipitations ont influencé le volume de lixiviat écoulé du compost.

À la ferme B, le volume de lixiviats récolté de l'andain couvert d'une toile imperméable est plus important que de l'andain non couvert. Dans ce cas, la section couverte se situait en bas de pente par rapport à la section non couverte.

Les commentaires qui suivent sont inspirés de la figure 5.6 qui illustre les productions de lixiviats obtenues à la ferme E. Le volume de lixiviats récolté en début d'essai sous le compost couvert de la toile imperméable est plus élevé (10,95 vs 9,70 L/m$^2$) que celui récolté du témoin. Par contre, après le premier retournement, le volume de lixiviats récolté du témoin est plus important (1,25 vs 0,9 L/m$^2$) que celui du compost couvert de la toile imperméable. Le volume de lixiviats récolté avant le premier retournement du compost couvert de la toile semi-perméable est nettement plus faible que la section témoin (2,9 vs 9,7 L/m$^2$). Par la suite, le volume de lixiviats récolté de ces deux sections d'andain est semblable (1,2 L/m$^2$ : toile et 1,25 L/m$^2$ : témoin). De façon pratique, la couverture de l'andain avec une toile semi-perméable permettrait une plus grande évaporation de l'eau du compost tout en protégeant le compost du lessivage par les précipitations, ce que les toiles de recouvrement imperméables et le non recouvrement de l'andain ne permettent pas.

### 5.5.1.6 Caractéristiques des lixiviats

Les lixiviats récoltés à la ferme E du compost couvert de la toile imperméable (film de polyéthylène) ont été en général plus concentrés que les lixiviats du compost couvert de toile semi-perméable (géotextile). De plus à la ferme B, la teneur des lixiviats du compost couvert est plus élevée que celle du compost non couvert pour les lixiviats produits au cours de la première saison de compostage à l'automne.

En résumé, on peut dire que l'utilisation d'une toile imperméable (film de polyéthylène noir) nous semble moins intéressante pour le compostage en andain des fumiers. Ceci nous apparaît particulièrement valable lors de la phase active du compostage. L'utilisation d'une toile imperméable permet cependant de réduire la perte, notamment

du potassium, par lessivage lors des précipitations automnales ou printanières. La toile semi-perméable ne semble pas nuire aux processus de compostage et diminue l'impact environnemental créé par les lixiviats. Lors d'un été sec, les avantages inhérents au recouvrement des composts seraient sans doute discutables. Il nous apparaît prioritaire de procéder à des essais rigoureux afin de préciser les effets du recouvrement des composts à l'aide de toiles et d'établir l'intérêt de cette pratique à la ferme tant d'un point de vue environnemental qu'agronomique.

### 5.5.2 EFFETS DES ABSORBANTS (À LA BASE DE L'ANDAIN) SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS

À la ferme E et au CRIQ, des lits d'absorbants ont été disposés sur le sol sous l'andain de compost. Un lit de paille d'une hauteur de 15 cm a été disposé sous les andains du CRIQ et de la ferme E. Un lit de 2,5 cm de sciure de bois et de 2,5 cm de tourbe brune a également été utilisé à la ferme E.

Des lixiviats ont été récoltés de tous les andains sous lesquels un lit absorbant a été utilisé (voir figure 5.6 et 5.8). Pour les lits absorbants considérés, le volume de lixiviats récolté pour la période complète d'essai (84 jours) par les lysimètres de 2 m² est de 4,4, 10,4, et 13,4 L pour respectivement la tourbe brune, la sciure de bois et la paille d'orge non-hachée. Des trois matériaux à l'essai et pour les quantités utilisées, la tourbe brune s'est révélée la plus efficace. L'efficacité de la sciure de bois devance celle de la paille d'orge non-hachée; trois fois moins de lixiviats ont été récoltés avec la tourbe brune qu'avec la paille. Avec la tourbe brune et la sciure de bois, la récolte de lixiviats a été retardée de 5 jours en comparaison avec la paille. L'écoulement de lixiviats issus du traitement avec le lit de paille a débuté 10 jours après la mise en andain.

La quantité utilisée pour les trois matériaux s'est avérée insuffisante pour absorber la totalité des liquides et empêcher ainsi l'écoulement de lixiviats dans le sol. Selon nos calculs, pour absorber tous les lixiviats récoltés, il aurait fallu doubler la quantité d'absorbants pour les trois matériaux. Par ailleurs, il faut noter que le fumier utilisé était plus sec que les fumiers de bovins laitiers utilisés dans les autres essais et que les lysimètres ne récoltent peut-être pas la totalité des lixiviats qui son potentiellement produits et qui s'écoulent en surface de ceux-ci.

Les essais de lit absorbant réalisés au CRIQ avec 15 cm de paille ont permis la récolte de 59,9 L de lixiviat au cours de la période d'essai de 145 jours pour une surface de lysimètre de 2 m². Selon nos calculs pour des conditions d'expérimentation

identiques, pour absorber tous ces lixiviats et empêcher l'écoulement dans le sol, la disposition sous l'andain d'un lit de paille d'une hauteur de 58 cm aurait été nécessaire. Il faut toutefois noter que ces calculs ne tiennent pas compte des volumes qui sont réellement produits et qui atteignent la surface du sol.

L'utilisation de lit absorbant à la base de l'andain dans le but d'éliminer la production de lixiviats à la base de l'andain se heurte à l'importance des quantités de matériel requis. De plus, le déplacement du lit lors du passage du retourneur d'andain et la décomposition du matériel absorbant pourraient constituer de sérieux problèmes. Cependant, l'utilisation combinée d'une toile de recouvrement et d'un lit absorbant devrait faire l'objet de recherches futures. Lors des essais à la ferme, aucun traitement ne combinait à la fois un lit absorbant et l'utilisation d'une toile de recouvrement.

Selon les essais à la ferme E, pour les vingt premiers jours de compostage, il faudrait ajouter, sur la ferme type, 25 t.m. de sciure de bois et 12 t.m. de tourbe brune. Ces quantités d'absorbants à ajouter à la base de l'andain avant le transport du fumier au champ suppose que la protection contre les lixiviats de la tourbe est 6 fois supérieure à la paille et celle de la sciure de bois est de 3 fois supérieure. Des essais plus rigoureux doivent être faits pour confirmer que l'utilisation de ces quantités de matériaux absorbants permettent de réduire de façon significative l'émission de lixiviats lors du compostage en andains au champs.

Selon nos calculs, en tenant compte des résultats sur plate-forme de béton (C3 à C6), il faudrait en moyenne environ 74 t.m. de paille pour absorber en totalité les lixiviats qui se seraient écoulés si la totalité des fumiers d'une ferme moyenne (474 t.m. de fumier à la reprise (BIOREX, 1989)) avait été compostée à l'extérieur dans des conditions similaires aux nôtres. Cela représenterait un déboursé annuel d'environ 5 700 $ (à 1 $/balle ou encore à 77 $/t.m. de paille) et représente une quantité supplémentaire de 6,3 kg/u.a.-j à ajouter lors de la mise en andain au champ. Pour le compost couvert C1 il faudrait environ 0,7 kg/u.a.-j de paille pour tout absorber les lixiviats. L'utilisation combiner de lit absorbant et de toile semi-perméable pour la protection des andains contre les précipitations n'a pas été mis à l'essais. Les quantités réelles de paille à utiliser pour absorber tous les lixiviats devrait donc se situer entre 0,7 et 6,3 kg de paille/u.a.-j.. Finalement, nous avons calculé au chapitre 7 la quantité d'absorbant à utiliser comme lit absorbant, en fonction de la teneur en eau probable du fumier lors de sa mise en andain au champs, pour certains scénarios de compostage environnementalement sécuritaire.

## 5.6 CONCLUSION

Les suivis du compostage des fumiers de bovins laitiers effectués sur les fermes, combinés aux essais de compostage permettent d'établir les constats suivants :

Le compostage du fumier en andain tel qu'il se pratique à la ferme (4 à 6 kg de litière/u.a.-j.) ne permet pas de respecter l'ensemble des paramètres du compostage mais autorise toutefois le déroulement des processus de compostage de façon satisfaisante compte tenu du contexte pratique d'opération. Parmi les paramètres de compostage qui ne rencontrent pas les valeurs optimales, on note une teneur en eau élevée et un rapport C/N bas. Conséquemment, la production de lixiviats et les pertes d'azote en cours de compostage sont inévitables si aucune modification n'est apportée aux pratiques actuelles.

En général, le retournement de l'andain provoque une oxygénation ponctuelle du matériel; la teneur en oxygène du compost en phase active redescend rapidement à des niveaux très faibles après le retournement. L'humidité élevée du fumier a tendance à ralentir l'oxygénation et la montée en température du compost. De plus, elle provoque l'écoulement de lixiviats, particulièrement en début de compostage.

Tous les andains de composts sous lesquels des lysimètres ont été installés ont permis de récolter des quantités variables de lixiviats. Aucune des alternatives visant à éliminer complètement la production de liquides à la base de l'andain n'ont atteint cet objectif. Le volume de liquide récolté pour des durées variables de compostage sur le sol, lors de la première année a varié entre 0,63 et 29,96 L/m$^2$ de lysimètre comparativement à environ 260 L / m$^2$ de surface des tas de compost C3 à C6 sur béton (cf. chap 4, tableau 4.23). L'analyse de la production de lixiviats lors du compostage à l'aide du taux d'émission surfacique (TESL en L/(m$^2$ - j)), indique des valeurs supérieures pour les essais sur plates-formes de béton comparativement aux essais à la ferme.

Le volume total de lixiviats récolté par le lysimètre en sable de l'andain A7 au CRIQ est plus faible que le volume récolté à la grille centrale des composts sur plate-forme de béton. Par contre, le calcul des pertes en eau par l'approche bilan montre des résultats similaires ($\approx$ 50 %) pour l'andain A7 et les traitements C3 à C6. Puisqu'il n'y a pas de raison de croire que l'évaporation de l'eau de l'andain A7 sur le sol est différente de celle des traitements C3 à C6 sur béton, on conçoit facilement que le volume de lixiviats qui s'écoule dans le sol doit être semblable aux volumes récoltés

sur les plates-formes de béton étanches. Le lixiviat s'écoulerait à la surface du lysimètre et pénétrerait dans le sol moins colmaté en périphérie. Cela démontre bien que le lysimètre en sable est moins perméable et qu'il y a un blocage partiel de celui-ci. La technique de contrôle du risque environnemental d'écoulement de lixiviat dans le sol doit être envisagé selon les résultats du chapitre 4 des essais sur plate-forme de béton étanche.

Les essais de compostage démontrent qu'aux teneurs en eau des fumiers habituellement observées sur les fermes, la production de lixiviats débute rapidement après la mise en andain du fumier. L'utilisation de lits absorbants à la base de l'andain a permis de retarder de quelques jours l'écoulement de liquides à la base de l'andain et de capter une partie des liquides écoulés du fumier dès la mise en andain. Par contre, les quantités de litières requises sont très importantes. L'utilisation d'un lit de paille à la base de l'andain comme moyen de protection contre l'écoulement de lixiviat dans le sol a donnée de moins bon résultat que l'utilisation de la sciure de bois et de la tourbe brune. La quantité d'absorbant à ajouter pour minimiser l'impact des lixiviats sur l'environnement et ne pas avoir d'écoulement de lixiviat dans le sol n'est pas connue de façon précise. Toutefois l'extrapolation des résultats obtenus à la ferme et sur béton révèle que la quantité sécuritaire d'absorbant a appliquer sera très élevée, en particulier pour la paille. Des essais rigoureux avec de la sciure de bois et de la tourbe devraient être fait pour pouvoir recommander les quantités sécuritaires de ces deux matériaux à utiliser sur la ferme.

L'utilisation de toiles pour le recouvrement des composts s'est traduite par une réduction de la quantité de lixiviats produits notamment après quelques semaines de compostage comparativement aux composts non couverts. L'utilisation d'une toile semi-perméable (géotextile) apparaît plus appropriée que la toile imperméable (film de polyéthylène noir) notamment pour la période active du compostage. Comparativement à la toile imperméable, le géotextile a permis de maintenir des températures plus élevées dans le compost, de réduire plus efficacement la TEE du compost et la quantité de lixiviats récoltée à la base de l'andain.

Pour l'ensemble des lixiviats analysés au cours de la première année, les teneurs moyennes obtenues pour l'azote, le phosphore et le potassium sont respectivement 1 234, 49 et 2 282 mg/kg b.h. Les valeurs moyennes de la DCO, la TEE, du pH et de la CE sont respectivement de 15 462 mg $O_2$/L, 98,4 %, 7,5 et 11,4 mS/cm. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus sur plate-forme de béton, nous permet de constater que le sol sous l'andain agit en début de compostage comme un filtre, mais qu'après un certain temps le risque environnemental associé à l'écoulement de lixiviat du compost apparaît tout aussi grand.

Les sols prélevés sous les andains de compost après des temps variables de compostage ont généralement des teneurs supérieures à celles des sols témoins. Pour l'azote total, le phosphore, le potassium, le calcium et le magnésium échangeables, les teneurs maximales mesurées dans le sol sous l'andain sont respectivement de 0,56 g/100 g sec, 852 kg/ha, 6 675 kg/ha, 6 245 kg/ha et 818 kg/ha.

L'ajout d'absorbant à la base de l'andain ou dans le fumier permet de contrôler le volume de lixiviat initial écoulé suite à la mise en andain du fumier. Le recouvrement des andains de compost à l'aide d'une toile perméable à l'air et imperméable aux précipitations qui tombent sur l'andain de compost permettra de diminuer l'humidité du compost et le volume de lixiviats en déviant en partie ou en totalité l'eau des précipitations. La comparaison des résultats sur les fermes avec ceux observés sur le béton au CRIQ et par BIOREX (1994), nous permet de dire que les résultats d'essais sur les plates-formes de béton du CRIQ peuvent être transposés dans le contexte de la ferme et être utilisés pour établir des recommandations pratiques qui soient environnementalement sécuritaires.

En conclusion, la contrainte environnementale majeure du compostage en andains à la ferme réside dans la production de lixiviats en cours de compostage. Les solutions alternatives doivent éliminer les lixiviats issus du ressuyage du fumier trop humide au départ et ceux causés par des précipitations importantes en cours de compostage. La combinaison de lits absorbants à la base de l'andain et de toile de recouvrement sur le compost apparaît une technique intéressante comme alternatives aux plates-formes de béton étanche, bien qu'elle n'ait pas fait l'objet d'essais dans le cadre de ce projet.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIOREX (1994). Bilan massique de deux régies du fumier incluant le compostage sur la ferme laitière québécoise. Québec : Ministère de l'Environnement. Rapport préliminaire. 147 p.

BPR. (1994). comm. pers.

Fournier, P. (1995). Le magnésium il faut s'en occuper!. Le Meunier, Hiver 95 : 6 et 15 p.

Jobin P. (1992). Évaluation de différents systèmes de compostage à la ferme : document provisoire. Centre de développement d'agrobiologie du Québec. 36 p.

Kirchman, H. et Witter E. (1988). Ammonia Volatilization During Aerobic and Anaerobic Manure Decomposition. Plant and soil. 115. P. 35-41

Ott, P.R. (1990). The Composting of Farmyard Manure with Mineral Additives and under Forced Aeration, and the Utilization of Fym and Fym Compost in Crop Production. Thèse de doctorat : Université des Landes Hessen. 275 p.

Robert L. (1992). Caractérisation et variabilité des fumiers au Québec. Dans : Colloque sur la gestion des fumiers, Drummondville, Québec. CPVQ. p. 203-214

Robitaille, R. (1994). Composter ou non vos fumiers ? À vous de choisir. Le producteur laitier québécois. Février 1994. p. 22-25.

# CHAPITRE 6 : COMPOSTAGE AVEC UN RÉACTEUR PROTOTYPE DU FUMIER DE BOVINS LAITIERS (CONCEPT NOVATEUR)

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

## 6.1 CONTEXTE

Le compostage en andain tel qu'il se pratique généralement à la ferme exige du temps et des manipulations pour la confection et le retournement des andains. De plus, cette technique nécessite de grandes superficies de terrain. Les risques potentiels pour l'environnement découlent des lixiviats issus du compost s'ils ne sont pas collectés ou traités. Le compostage en andain avec retournement mécanique et ses effets sur l'environnement ont été décrits au chapitre 4.

Habituellement, les procédés de compostage sont regroupés en deux classes : les systèmes ouverts et fermés. Les systèmes ouverts sont soumis aux aléas climatiques tandis que les systèmes fermés ne le sont pas. Les systèmes ouverts incluent les andains aérés par brassages mécaniques ou par aération forcé. Les retournements mécaniques se font à l'aide d'équipements spécialisés ou de tracteurs munis d'une pelle frontale.

Les systèmes fermés sont habituellement constitués de bioréacteurs horizontaux ou verticaux équipés d'appareils de mesure et de contrôle de la température, du taux d'oxygène et de l'humidité du compost. Même si plusieurs types de systèmes de compostage en réacteur sont opérationnels et vendus dans plusieurs pays, il n'existe pas encore de système commercial adapté au contexte de la ferme pour le compostage en réacteur des fumiers de bovins laitiers.

Le compostage à la ferme nécessite l'utilisation de techniques simples. Les coûts d'acquisition et d'opération doivent être abordables et les équipements de compostage adaptables à ceux déjà existants sur la ferme laitière québécoise. Selon les hypothèses émises lors d'études antérieures (BIOREX 1989), le système de compostage en continu, à la sortie de l'étable, est l'approche qui s'avérerait la plus intéressante pour l'environnement car elle minimiserait les pertes à l'environnement (BIOREX, 1989). Il permettrait l'entreposage du compost directement sur le sol et permettrait ainsi de diminuer le coût d'entreposage des fumiers.

Toujours selon BIOREX (1989), pour que le système de compostage en continu n'entraîne pas de coût supplémentaire sur la ferme type (31 vaches laitières), le coût d'acquisition et d'installation d'un tel système ne devrait pas excéder 32 000 $ (pour une capacité de 2 t.m./j) pour un système subventionné à 60 % par le programme PAAGF du MENVIQ et un coût d'opération annuel correspondant à 5 % du coût d'acquisition et d'installation du système. L'implantation d'un système de compostage

en continu doit réduire les coûts d'entreposage des fumiers à la ferme pour qu'il soit intéressant à considérer. Ces coûts ont été estimés en 1989 dans l'étude de BIOREX pour une ferme type. Dans le cas d'une ferme de plus grande importance, les coûts acceptables doivent être évalués.

## 6.2 OBJECTIFS

La conception, l'installation et l'opération d'un système de compostage en continu à la ferme est l'objectif principal de ces essais. Plus spécifiquement, ces essais consistent à :

- Concevoir un système de compostage en continu pour une ferme laitière.
- Installer et adapter le système sur la ferme en tenant compte des contraintes imposées par les propriétaires.
- Opérer et faire le suivi du procédé afin d'établir les performances du système implanté.
- Suggérer les améliorations nécessaires au bon fonctionnement de ce type de procédé.
- Évaluer la viabilité technique et économique du système et la pertinence de son utilisation à la ferme.

## 6.3 CONCEPTION DU RÉACTEUR PROTOTYPE, NOVATEUR

### 6.3.1 CONTRAINTES

Le développement du concept novateur de compostage en réacteur reposait sur un ensemble d'hypothèses et d'objectifs qui ont été établis au début du projet conjointement avec les consultants BPR inc. et les propriétaires de la ferme Berthely. Le procédé devait répondre aux exigences et aux contraintes suivantes :

- L'unité de compostage mise à l'essai sera attenante au système d'évacuation et d'entreposage déjà en place.
- Le système de gestion des fumiers sera opérationnel avec ou sans unité de compostage, 365 jours par année.
- Le procédé sera entièrement contrôlé et automatisé; il n'exigera pas de main-d'oeuvre supplémentaire comparativement à une gestion conventionnelle des fumiers.
- Le procédé sera opérationnel pour un fumier contenant des quantités de litière variables et permettra la production d'un compost de qualité constante et uniforme.
- Le procédé n'exigera pas de développement majeur; il utilisera des technologies existantes.
- La durée du compostage en réacteur devra permettre une réduction du volume de fumier d'au moins 30 %.
- Le système pourrait récupérer et traiter les gaz à la sortie du réacteur; il permettrait aussi de récupérer l'énergie thermique dégagée lors du compostage.
- Le compostage en réacteur du fumier s'effectuera avec un matériel dont la teneur en eau b.h. se situe entre 70 et 75 %, pour assurer un compostage optimal.
- Un minimum d'espace sera utilisé pour le système de compostage en réacteur; l'espace disponible dans l'annexe à compostage sera maximisé.

- Le coût de l'unité de compostage devra être inférieur à 25 000 $ (incluant l'entrepôt à compost) pour une ferme type (de 31 vaches laitières).

- Le procédé devra s'adapter aussi bien au système avec montée d'écureur qu'au système avec évacuateur souterrain.

- Le système d'entreposage du compost sera couvert d'une toiture et sera peu complexe.

Lors de la conception du système, la nécessité de disposer d'un système d'essorage du fumier pour assurer un compostage optimisé en réacteur est apparue très tôt. Un état des équipements et systèmes (de compostage et d'essorage) disponibles a été fait par les consultants BPR inc. en collaboration avec l'équipe du CRIQ.

En ce qui concerne le choix du procédé, plusieurs idées, concepts ou configurations de système ont été imaginés. Parmi celles-ci, on dénote les systèmes en silo-corridors, les silo-verticaux de type Harvestor utilisés à la ferme pour l'entreposage des grains et des fourrages, un système de cuve avec chargement et déchargement du fumier à l'aide d'un bras articulé, les systèmes de cylindre rotatif horizontaux, les systèmes horizontaux avec utilisation d'épandeurs à fumier modifiés, etc.

Plusieurs de ces systèmes sont pourvus de caractéristiques intéressantes. Mais celles-ci ne correspondaient pas entièrement aux exigences du projet. Dès le départ, le système de cuve avec chargement et déchargement du fumier à l'aide d'un bras articulé a été éliminé car le temps supplémentaire requis pour manipuler le fumier est apparu non conforme aux attentes du producteur.

Les systèmes de cylindre rotatif horizontaux et les silo-corridors ne rencontraient pas les contraintes du projets car la surface de plancher requise par ces systèmes étaient trop importante et le coût pour abriter ces types de systèmes étaient élevés. Par ailleurs, les systèmes de compostage avec des épandeurs à fumiers modifiés nécessitaient aussi une surface de travail assez important et la conception d'un système d'aération performant qui permet un déchargement du compost et la circulation des râteaux métalliques sur le plancher de l'épandeur, sans briser ni bloquer le système d'aération.

Les systèmes avec silo-verticaux de type Harvestore qui ne sont pas utilisés pour le compostage du fumier et les équipements habituellement utilisés pour le chargement et le déchargement de l'ensilage à la ferme n'étaient pas adaptés aux caractéristiques des fumiers et des composts. De plus, l'espace requis par les silo-verticaux ne

correspondait pas à l'espace disponible à la ferme Berthely. Les silo-verticaux ne répondaient donc pas parfaitement aux contraintes mentionnées ci-haut tous en représentant des coûts élevés et un risque important quant à la conception du système de déchargement du compost.

Étant donnée le peu d'espace disponible dans l'annexe à compost et le niveau d'automatisation requis, le choix du procédé de compostage s'est orienté vers un réacteur vertical qui se décharge par le bas. Le développement d'un système de fourches permettait d'assurer le déchargement d'une quantité précise de compost. De plus ce système permettait une aération efficace dans l'espace libre entre les fourches et le fond du réacteur (plénum).

### 6.3.2 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU CONCEPT

Suite à une recherche d'informations et aux différentes consulations effectuées par les Consultants BPR inc. sur les systèmes de compostage des fumiers, les options suivantes ont été retenues pour la conception du procédé novateur en vue de son implantation à la ferme :

- Séparation des liquides du fumier avec une essoreuse à vis, pour obtenir en début de compostage un fumier essoré dont la TEE se situe entre 70 et 75 %.

- Séparation de l'ensemble du fumier produit par le troupeau de l'entreprise laitière choisie et compostage de la fraction solide essorée.

- Construction de deux réacteurs côte-à-côte d'une égale capacité pour assurer une production constante de compost de qualité uniforme.

- Capacité volumique des deux réacteurs correspondant à 20 jours de production de fumier.

- Compostage durant 10 jours dans le premier réacteur avec alimentation et vidange de celui-ci. Au cours de la même période, compostage sans alimentation et sans vidange du deuxième réacteur.

- Alternance à tous les 10 jours de la séquence d'alimentation et de vidange de chacun des réacteurs.

- Circulation verticale (du haut vers le bas) du compost dans le réacteur permettant de maximiser l'espace disponible.
- Répartition du fumier essoré dans le réacteur à l'aide d'un convoyeur-répartiteur.
- Contrôle du volume de compost évacué du réacteur à l'aide d'un système de fourche et de vis.
- Contrôle des températures du compost par aération.
- Possibilité d'aérer par le fond du réacteur (plénum sous les fourches) et par des orifices sur les parois du réacteur au moyen d'une ventilation positive.
- Possibilité d'ajuster le débit d'air par réacteur de 0 à 850 $m^3/h$.
- Possibilité d'entreposer la fraction liquide issue de l'essorage du fumier dans les purots ou de la réintroduire éventuellement dans le compost.

# 6.4 MATÉRIEL ET MÉTHODE

## 6.4.1 DESCRIPTION DE LA FERME

### 6.4.1.1 Troupeau

La ferme Berthely est une entreprise agricole laitière sise au 404, 4e rang Ouest à Honfleur dans le comté de Bellechasse. Propriété de monsieur et madame Jean-Marie et Céline Laliberté, la ferme Berthely remportait en 1992 la prestigieuse médaille d'Or du Mérite Agricole Québécois. La ferme Berthely compte au total un cheptel d'environ 93 animaux qui se répartissent de la façon suivante : 62 vaches laitières, 19 génisses et taures (1 à 2 ans), 12 veaux (0 - 1 an) pour un total de 77,5 unités animales.

Les vaches laitières et les sujets de remplacement sont logés dans une seule étable à stabulation entravée (vaches attachées). Les veaux sont en stabulation libre dans de petits enclos et reçoivent principalement de la ripe comme litière. Les vaches ne sortent pas à l'extérieur de l'étable.

### 6.4.1.2 Litières

La litière utilisée à la ferme pour l'ensemble du troupeau est constituée de paille d'orge hachée (1,55 kg/u.a.-j), de ripe de bois d'épinette (0,40 kg/u.a.-j), de ripe de pin (0,23 kg/u.a.-j) et de sciures de bois (0,70 kg/u.a.-j) pour une quantité totale de litière de 2,88 kg de litière/u.a.-j. La litière est ajoutée une fois par jour et placée manuellement sous les animaux. La paille est hachée dans l'étable à l'aide d'un hache-paille, avant d'être épandue sous les animaux. Les essais préliminaires d'essorage ont démontré qu'il était difficile mécaniquement d'essorer un fumier contenant de la paille longue non hachée avec l'équipement mis en place.

Dans le cadre des essais de compostage en réacteur, la quantité de litière ajoutée aux animaux est de 2,72 kg/u.a.-j.. Les essais de compostage ont été réalisés sur la moitié du fumier produit et provenait des 40 premières unités animales situées juste en amont de la montée d'écureur. Une quantité moindre de sciure de bois, correspondant à 0,54 kg/u.a.-j, est utilisée pour ces animaux.

Aucune autre substance n'est ajoutée aux déjections dans l'étable. Les eaux usées de laiterie sont acheminées directement dans la fosse septique de la laiterie.

#### 6.4.1.3 Déjections

La masse quotidienne de fumier produit par l'ensemble du troupeau de la ferme est estimée à 4 774 kg (déjections et litière), soit environ 4,77 $m^3$/jour (incluant les liquides) pour une masse volumique apparente humide approximative de 1 000 kg/$m^3$. Ces données correspondent à une production de 61,6 kg/u.a-j de fumier (fèces + urine + litière). Le fumier utilisé pour les essais de compostage en réacteur provient de 40 u.a. (plus de 50 % des déjections totales du troupeau). La production quotidienne de déjections mesurée pour les 40 u.a. est de 2 464 kg/jour (fèces + urine + litière).

#### 6.4.1.4 Évacuation des fumiers

L'écurage et l'évacuation du fumier se font une fois par jour, le matin. L'écureur à chaîne situé dans le fond du dalot transporte le fumier à l'entrepôt à fumier ou, pour les fins d'expérimentation, dans une trémie greffée à une essoreuse localisée dans l'annexe à compostage. Une ouverture dans la montée d'écureur a été pratiquée pour permettre au fumier de se déverser dans la trémie d'alimentation de l'essoreuse.

Il est possible d'entreposer séparément dans l'entrepôt, le fumier frais, le liquide d'essorage et le fumier composté. Les liquides non absorbés par la litière avant la montée d'écureur sont canalisés vers le puit de pompage situé dans l'annexe à compostage.

#### 6.4.1.5 Structures de compostage et d'entreposage des fumiers

Tel qu'illustré à la figure 6.1, la ferme laitière choisie comprend une étable avec système de montée d'écureur, un bâtiment couvert pour le compostage en réacteur (annexe à compostage) et un abri à fumier.

L'abri à fumier comprend deux sections : une plate-forme de béton étanche (15,24 m X 18,3 m X 1,83 m) pour loger la fraction solide et, un purot étanche d'une capacité de 208 $m^3$ (en 3 sections d'égale capacité) pour entreposer la fraction liquide. Une toiture en tôle supportée par des fermes d'acier couvre cette structure d'entreposage

(plate-forme et purot). Le purin égoutté du tas de fumier s'écoule vers un puit de pompage avant d'être entreposé dans les purots.

L'annexe à compostage est localisée entre l'étable et l'abri à fumier. Cette pièce, sur plancher de béton, est isolée (R20 dans les murs et la toiture) et complètement fermée. La surface de l'annexe est de 28,4 $m^2$. L'annexe abrite l'essoreuse à fumier, les deux réacteurs à compost, un réservoir en acier inoxydable de 2 268 litres et un puit de pompage pour le transfert des liquides vers les purots, un convoyeur pour la montée du fumier essoré, un convoyeur mobile à dévidoir pour la répartition du fumier dans le réacteur, une vis d'évacuation pour le fumier composté, un système d'acquisition de données et le système électrique. La température de l'annexe est maintenue de façon constante au-dessus de 5 °C à l'aide d'un aérotherme. Tous ces équipements sont décrits en détail à la section 6.4.2.

#### 6.4.1.6 Épandage des fumiers et composts

La ferme Berthely dispose de 40 hectares de prairies de graminées, de 15 hectares de prairies de légumineuses et de 15 hectares de céréales d'orge. L'épandage des fumiers est effectué à l'aide d'un épandeur étanche à décharge latérale John Deere 876, d'une capacité de 7,5 $m^3$.

### 6.4.2 DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

Le système de compostage en réacteur implanté à la ferme Berthely comprend les composantes suivantes : 1 essoreuse à fumier, 2 réacteurs à compost ainsi que les convoyeurs de vidange et de remplissage des réacteurs. L'agencement des équipements est illustré à la figure 6.1.

#### 6.4.2.1 Essoreuse à fumier

L'essoreuse à fumier est de type «presse à vis». Elle fonctionne à l'aide d'une vis sans fin qui comprime le fumier. La pression exercée sur le fumier est obtenue par un couvercle de forme conique placé en bout de vis. Un bouchon de fumier solide est formé par cette restriction. Le degré d'essorage est obtenu par l'ajustement d'un couteau qui régie la formation du bouchon de fumier solide. La taille des mailles du tamis cylindrique placé autour de la vis d'essorage est de 1,5 mm. Le débit d'essorage de l'équipement varie entre 1 et 2 $m^3$ de fumier/heure.

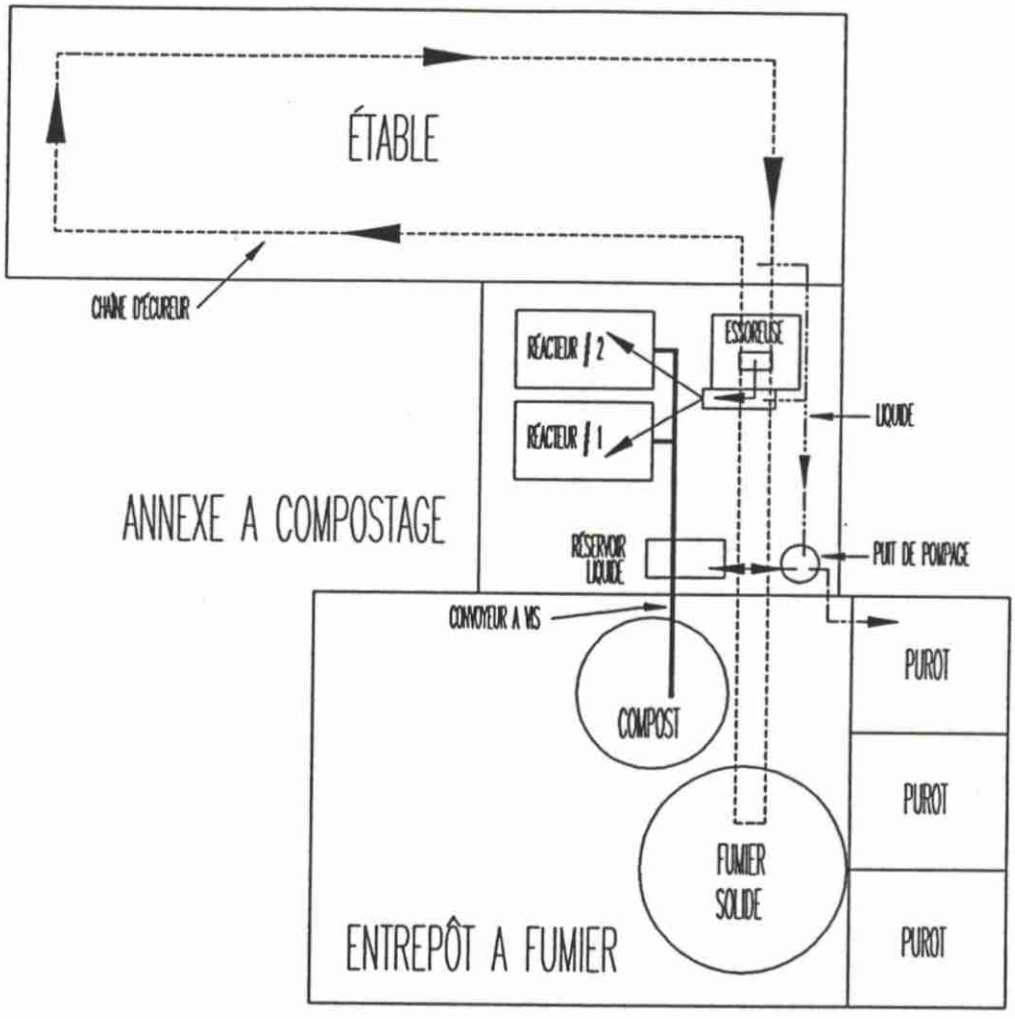



**Figure 6.1 : Schéma d'ensemble de la ferme Berthely**

L'essoreuse de marque Reime est de fabrication norvégienne. Elle était commercialisée par la compagnie WIC inc. de Wickam. On retrouve à l'annexe B, l'information technique obtenue du distributeur. L'essoreuse a été initialement conçue pour essorer un matériel liquide ou pâteux. La compagnie WIC inc. a dû concevoir et fabriquer une trémie d'alimentation pouvant recevoir les déjections de la ferme ainsi que le mécanisme de transfert du fumier de la trémie à l'essoreuse. La capacité volumique de la trémie est de 2,3 $m^3$, ce qui représente environ la moitié du volume de fumier produit quotidiennement par l'ensemble du troupeau. Le sous-dimensionnement de la trémie s'explique par des contraintes d'espace dans l'annexe à compostage construite avant la conception de la trémie (hauteur sous la montée d'écureur). Un moteur électrique de 10 HP (7,5 kW) actionne la vis d'alimentation de la trémie ainsi que la vis de l'essoreuse.

#### 6.4.2.2 Réacteurs à compostage

Le réacteur à compost est présenté à la figure 6.2. Il consiste en une boîte fermée de 4,72 m de longueur par 2,21 m de largeur et de 2,44 m de hauteur. La capacité volumique d'un réacteur est de 28 $m^3$. À la base du réacteur, on retrouve un système de fourches mobiles sur lequel repose le matériel (compost). Le volume sous les fourches est de 3,2 $m^3$ et le volume utile au-dessus des fourches est de 25 $m^3$. Un système hydraulique de 5,6 kW (7,5 HP) permet d'ouvrir et de fermer les fourches pour vidanger le fumier composté. L'aération est assurée par une soufflante (pression positive) de 2,24 kW (3 HP) qui introduit l'air dans le réacteur par le plénum sous les fourches ou par des orifices (4,7 mm) disposés à tous les 15 cm dans les parois latérales et les parois centrales du réacteur (figure 6.2). Le débit d'air introduit dans le réacteur peut varier de 0 à 850 $m^3/h$ et se contrôle par des vannes à guillotine. Le réacteur est isolé avec du styrofoam de 5 cm d'épaisseur, ce qui se traduit par un facteur isolant RSI supérieur à 10. La partie inférieure du réacteur est en acier et les murs sont en bois de contreplaqué fixé sur une armature d'acier. Deux vis sans fin pour la vidange du compost sont placées dans le bas du réacteur sous les fourches et permettent de vider un volume de compost compris entre 2,7 à 3,2 $m^3$. Le matériel à composter dans le réacteur circule donc du haut vers le bas.

L'aération forcée du fumier optimise les processus de compostage. Selon le matériau (plus ou moins fermentescible) à composter, l'aération sera différente. Mustin (1987) estime les besoins en aération de la façon suivante : fort de 8 à 15 $m^3/(h\text{-}t.m.)$, moyen de 1,5 à 8 $m^3/(h\text{-}t.m.)$ et faible < à 1,5 $m^3/(h\text{-}t.m.)$. Besson (1982) a évalué les pertes d'azote en fonction du taux d'aération du fumier pour des débits d'air compris entre 0,6 et 3 $m^3/(h\text{-}t.m.)$. Quant à lui, L'Heureux (1993) aère le compost à des débits

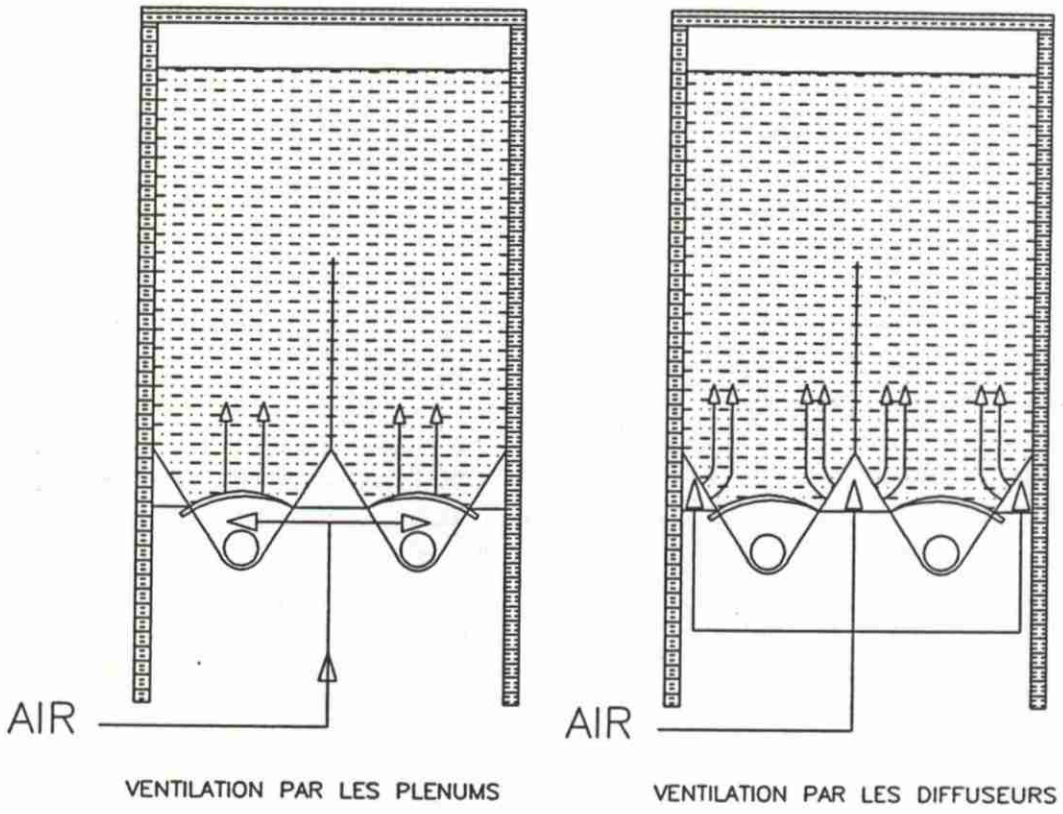



**Figure 6.2 : Réacteurs à compost**

supérieurs de 36 à 151 $m^3$/(h-t.m.) pour contrôler la température et éviter la surchauffe du matériel et l'anaérobiose locale dans la masse.

Selon le débit d'air injecté dans le compost, l'aération permet d'atteindre trois objectifs. Par ordre croissant de débit d'air ($m^3$/h-t.m.), les objectifs suivants sont poursuivis :

A) L'obtention d'un taux minimum d'oxygène dans les espaces lacunaires du compost pour l'ensemble de la masse afin de permettre le travail des micro-organismes aérobies. Aucun contrôle des températures n'est fait dans ce cas; en général, l'hygiénisation de matériel tel que le fumier, par l'atteinte de hautes températures (>70 °C), s'effectue très facilement à ces débits d'air.

B) La recherche des conditions optimales de développement microbiologiques par contrôle des températures ($\approx$ 60 °C, Mustin, 1987 & Jeris, 1973). Dans ce cas, l'aération du compost est plus élevée qu'en A.

C) L'assèchement du compost par l'injection d'un très grand débit d'air. À ce taux d'aération, l'énergie requise pour faire fonctionner le système d'aération et assécher le matériel est plus élevée qu'en B et A.

Une différence énorme existe entre chacun des types de ventilateurs requis (notamment au niveau de la puissance des moteurs et des caractéristiques techniques du ventilateur) pour les trois situations précédemment décrites. Le coût de fonctionnement des équipements de ventilation est par ordre d'importance du plus faible au plus élevé A, B et C.

L'augmentation du débit d'air injecté dans le compost favorise les pertes d'azote ammoniacal par volatilisation (Besson, 1982). Par contre, plus la température est élevée plus les pertes d'azote ammoniacal sont élevées. De plus, dans certain cas, l'aération subite d'un matériel en anaérobiose favoriserait les pertes par dénitrification sous forme de $N_2$.

L'injection d'air ne se traduit pas automatiquement par un contrôle uniforme de la température de l'ensemble de la masse. En hiver, des différences plus marquées de température dans la masse seront constatées pour les systèmes où l'air extérieur n'est pas réchauffé avant son incorporation dans le compost. Un même débit d'air provoquera des transformations différentes du matériel en fonction du lieu (dans le réacteur) et de l'état de transformation à laquelle le matériel se trouve. Par exemple, plus le compost est près de l'entrée d'air, plus il se refroidit rapidement. L'aération du compost se fera en tenant compte de l'ensemble de ces facteurs.

#### 6.4.2.2.1 Fonctionnement du concept novateur de compostage

Le diagramme d'écoulement du fumier à la ferme Berthely est présenté à la figure 6.3.

Le fumier est acheminé dans la trémie de l'essoreuse par la chaîne d'écureur à un débit de 9,2 $m^3/h$. Un drain localisé à la base de la montée d'écureur dévie, de la trémie vers le puit de pompage, une partie des liquides non absorbés dans le dalot. De la trémie, le fumier est introduit dans l'essoreuse par une vis sans fin. La fraction liquide du fumier essoré est dirigée vers le puit de pompage et transférée dans un réservoir en acier inoxydable pour la mesure du volume et l'échantillonnage, avant d'être pompée dans les purots. Le fumier essoré est introduit dans le haut des réacteurs par l'entremise d'un convoyeur à palette incliné à 54° qui se déplace d'un réacteur à l'autre. La distribution uniforme du fumier dans les réacteurs se fait à l'aide d'un convoyeur horizontal muni d'un répartiteur placé au centre du réacteur déversant en alternance le fumier à gauche et à droite dans le réacteur.

Le concept de compostage du fumier comprend l'utilisation de deux réacteurs. Le temps de rétention total du fumier dans un réacteur est de 20 jours alors que le temps de remplissage d'un réacteur est de 10 jours. Les deux réacteurs sont pleins après les 20 premiers jours de fonctionnement en continu. Après 20 jours de rétention dans un des réacteurs, on ouvre les fourches pour faire descendre le compost dans le plénum. Les fourches sont refermées et l'on vide le plénum à l'aide de deux vis sans fin. Après la vidange, on ouvre le couvercle et on emplit de fumier frais essoré le réacteur d'un volume équivalent à celui que l'on vient d'enlever. On alterne les opérations d'alimentation/vidange d'un réacteur à l'autre à tous les 10 jours. Les opérations de vidange et de remplissage sont illustrées à la figure 6.4. Le compost est acheminé dans l'entrepôt à fumier par une vis sans fin.

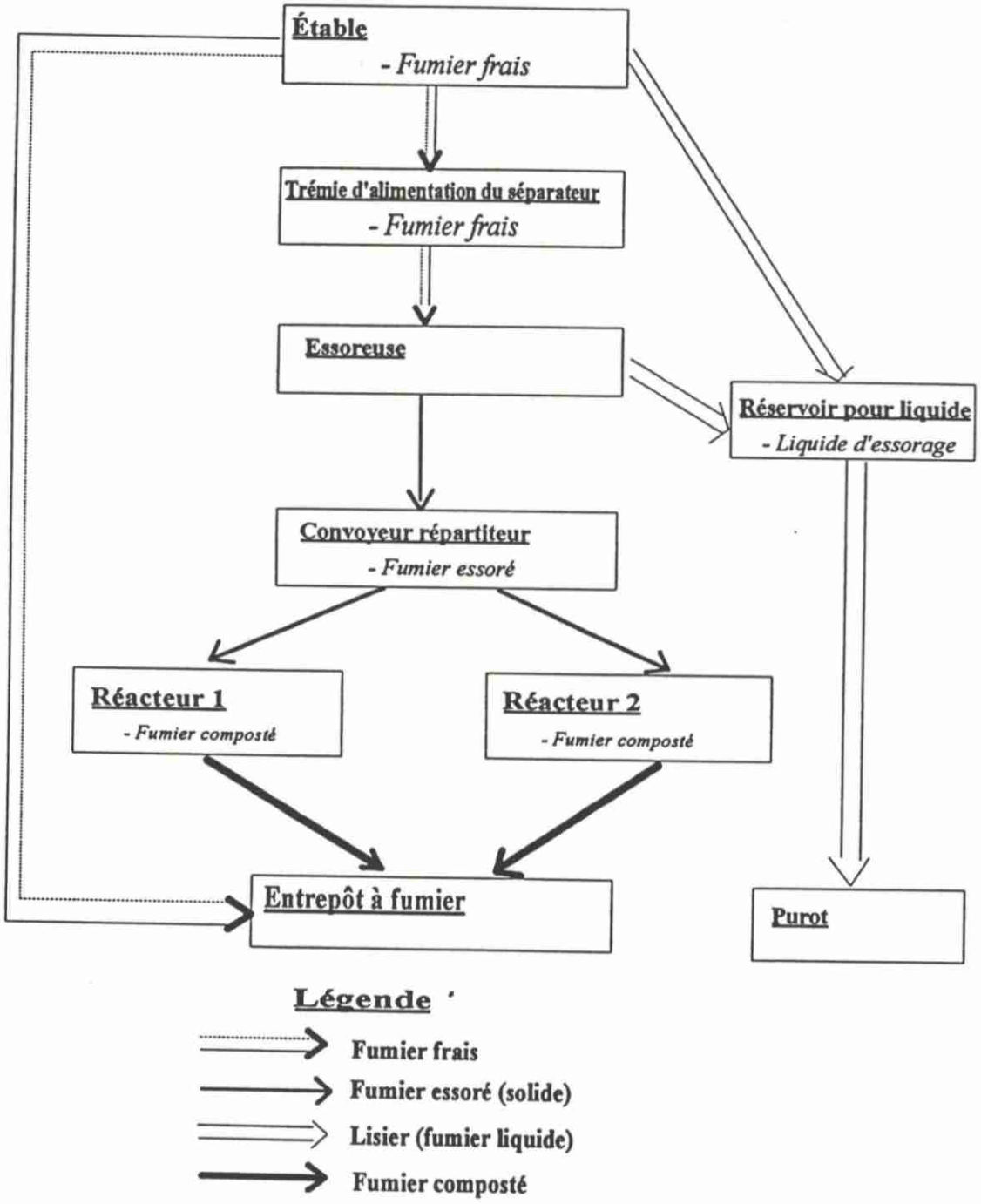



Figure 6.3 : Diagramme d'écoulement du fumier

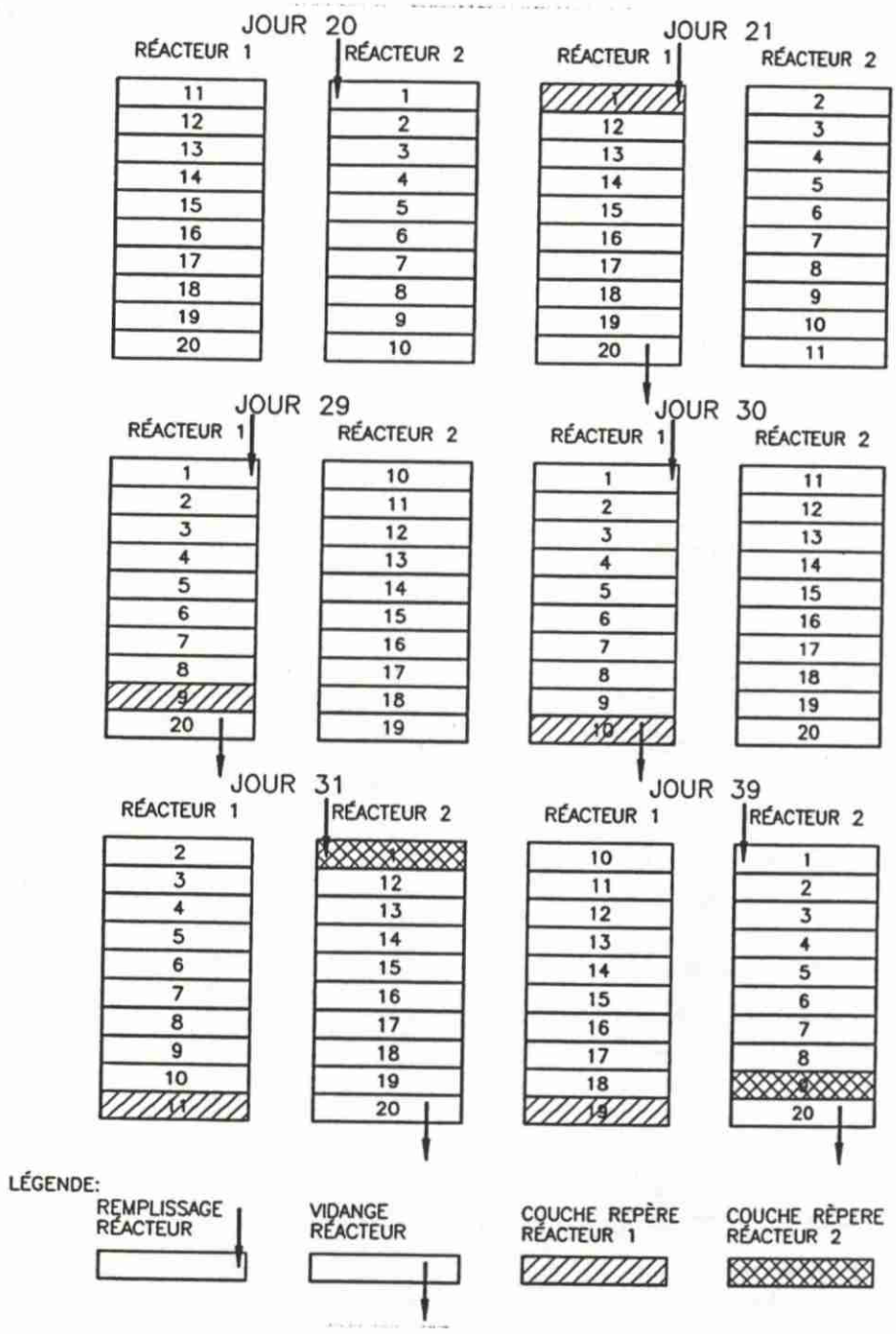



**Figure 6.4 : Séquence d'opération des deux réacteurs à compost**

## 6.4.3 OPÉRATION ET ÉCHANTILLONNAGE

L'essorage quotidien du fumier a été généralement effectué entre le démarrage de l'écureur et la vidange complète de la trémie de l'essoreuse. Le reste du fumier non essoré était disposé directement dans l'entrepôt à fumier. Le fumier frais a été échantillonné dans la trémie d'alimentation de l'essoreuse. Le liquide d'essorage est échantillonné dans le réservoir d'entreposage en acier inoxydable et le fumier essoré est échantillonné à la sortie de l'essoreuse. Le compost est échantillonné dans le réacteur en trois endroits différents et à une profondeur identique.

### 6.4.3.1 Équipements de mesure et méthodes d'analyse

#### 6.4.3.1.1 Équipements de mesure

Les différentes mesures en cours d'essais ont été réalisées à l'aide des appareils suivants :

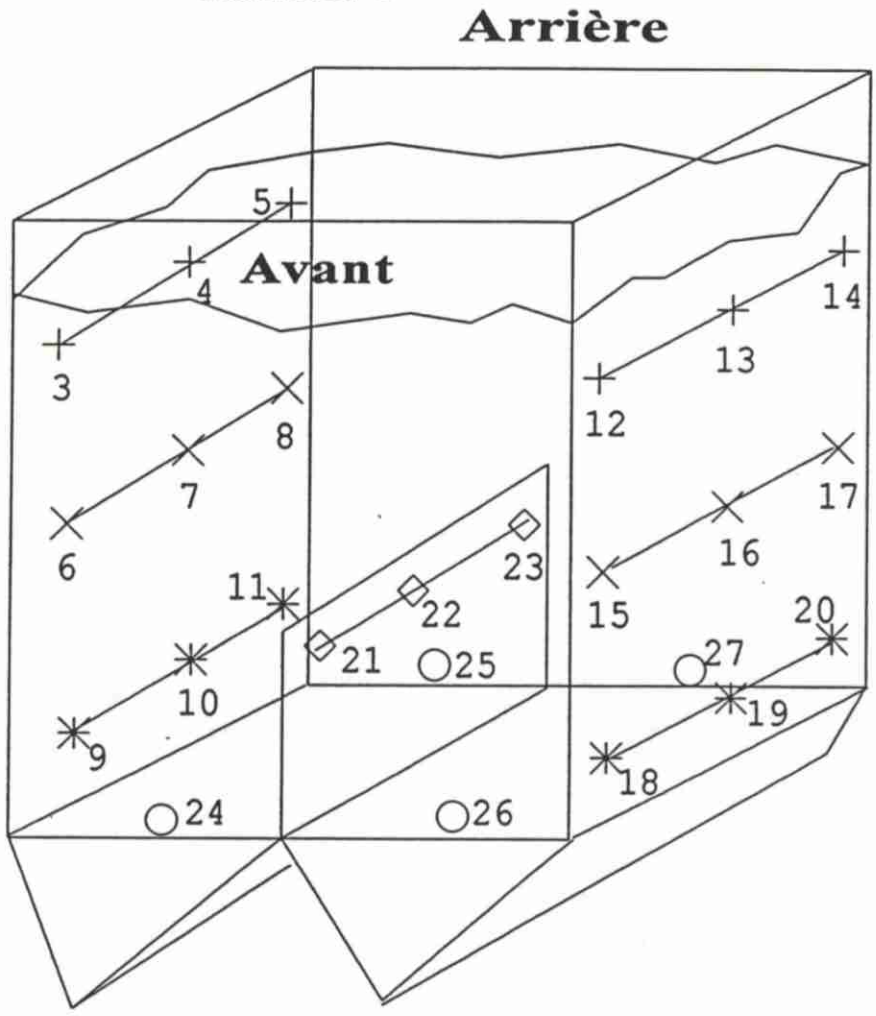
- Un système d'acquisition de données Fluke Hydra, modèle 2 620A, pour l'enregistrement des mesures des températures, des masses des réacteurs, des débits d'air et des pertes de pression de l'air dans le compost.

- 25 thermocouples de type K disposés dans chaque réacteur tel qu'illustré à la figure 6.5.

  Il est à noter que les 25 thermocouples disposés dans chaque réacteur sont regroupés selon la configuration suivante :

  - groupe A : haut du réacteur;
  - groupe B : milieu du réacteur;
  - groupe C : bas du réacteur;
  - groupe D : séparateur paroi centrale;
  - groupe E : extrémités du réacteur.

- 1 thermocouple de type K pour la mesure de la température de l'air à l'entrée des réacteurs et 2 thermocouples pour la température de l'air à la sortie des réacteurs.




# Légende

**Groupe:**

- **A: Sondes 3 à 5, 12 à 14 (haut :à 46 cm du couvercle) +**
- **B: Sondes 6 à 8, 15 à 17 (milieu : à 117 cm du couvercle) ×**
- **C: Sondes 9 à 11, 18 à 20 (bas : à 198 cm du couvercle) ✳**
- **D: Sondes 21 à 23 (paroie centrale : à 160 cm du couvercle) ◇**
- **E: Sondes 24, 25, 26, 27 (Extrémités : à 8 cm au-dessus des fourches) ○**

Figure 6.5 : Disposition des thermocouples dans un réacteur

- 1 thermomètre à cadran de marque REOTEMP pour prise de températures ponctuelles dans le réacteur.
- 1 lecteur à oxygène portatif de marque TAI (Teledyne analytical instruments) modèle 320 P/D.
- Pompe et tube «Dragger» pour la lecture des concentrations d'ammoniaque dans l'air.
- Analyse des concentrations en $CO_2$, $O_2$, $N_2$ de l'air par chromatographie en phase gazeuse (GC).
- 8 balances (cellules de charge de marque WEIGH-TRONIX) pour la pesée des réacteurs en continu.
- 1 balance portative (de marque HOWERICHARSON) pour la pesée des litières.
- 2 sondes de pression différentielle (de marque ASHCROFT) pour la mesure de la perte de charge de l'air dans le compost.
- 2 sondes de vélocité (de marque TSI) pour la mesure des débits d'air à l'entrée des réacteurs.
- 2 sondes de niveaux pour la mesure de la réduction du volume et de la compaction du compost dans le réacteur.
- 1 réservoir en acier inoxydable avec règle graduée pour la mesure des volumes du liquide d'essorage.
- 1 chronomètre digital.

#### 6.4.3.1.2 Méthodes d'analyse

Les méthodes d'analyse utilisées pour la caractérisation des fumiers frais et essorés, des composts et des liquides d'essorage sont les mêmes que celles décrites au chapitre 4 à la section 3.6.

### 6.4.4 DESCRIPTION DES ESSAIS

Parallèlement aux travaux initialement prévus de compostage des fumiers en réacteur, plusieurs investigations ont été faites dans le cadre de ce projet :

- Quantités et types de litière utilisés à l'étable.
- Essais d'essorage avec paille hachée et non hachée.
- Essais mécaniques et modification de l'essoreuse à fumier.
- Essais de performance de l'essoreuse.
- Essais de compostage du fumier essoré sans réacteur.

Ces essais se sont déroulés au cours des mois de janvier, février et mars 1993. Au cours de cette période, les diverses composantes du système de compostage (essoreuse et trémie d'alimentation, ouverture des fourches et vis de vidange du réacteur, convoyeurs) ont été mises à l'essai pour en vérifier le bon fonctionnement. La mise à l'essai des équipements d'acquisition de données a également été faite.

La masse et le type de litière ainsi que le nombre d'unités animales ont été déterminés précisément avec le propriétaire de la ferme, M. Jean-Marie Laliberté. Les détails sont présentés à la section 6.4.1.

#### 6.4.4.1 Essorage du fumier

Plus d'une vingtaine d'essorages de fumier frais ont été faits entre le 20 janvier et le 24 février 1993. Au cours de cette période, le bilan complet de l'essorage a été fait à trois reprises, soit les 15, 16 et 24 février 1993. Les masses de fumier frais, de fumier essoré et des liquides d'essorage ainsi que leurs concentrations respectives en eau, matière organique, azote, phosphore et potassium ont été déterminées pour établir le bilan de l'essorage.

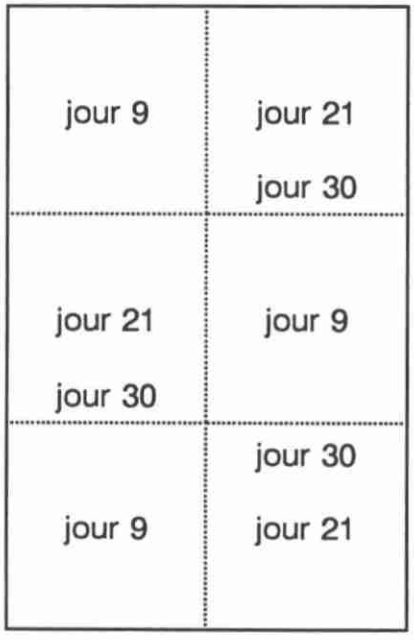
Ces essais ont permis d'établir les caractéristiques de fonctionnement de l'essoreuse : débit d'essorage et teneur en eau du fumier essoré pour différents ajustements. De plus, des problèmes mécaniques importants ont été occasionnés par l'écoulement du fumier de la trémie d'alimentation à l'essoreuse au cours de ces essais.

### 6.4.4.2 Compostage en réacteur

Au cours des mois de janvier et de février 1993, le fumier essoré a été introduit dans le réacteur pour y être composté. Au cours de la période de remplissage, la production de fumier essoré du 15 février (pour 40 u.a.) a été identifiée à l'aide de marqueurs dans le réacteur. Ce fumier correspond à la couche de compost au temps zéro (couche repère). Le fumier essoré a été ajouté par la suite à chaque jour par-dessus cette couche de compost jusqu'à ce que le réacteur soit entièrement plein. La couche de compost contenu entre les marqueurs, a été échantillonnée après des temps de séjour de 9, 21 et 30 jours. L'échantillonnage s'effectue en creusant jusqu'à la couche identifiée par les marqueurs, à trois endroits différents soit à l'avant, à l'arrière et au centre du réacteur. La figure 6.6 montre les différents points d'échantillonnage en fonction du jour de prélèvement.

Vue en plan

Avant du réacteur




Arrière du réacteur

**Figure 6.6 : Points d'échantillonnage de la couche de compost dans le réacteur**

Le débit d'air introduit initialement (du 4 au 15 février) dans le réacteur était de 92 $m^3/h$. Après, le débit d'air a été graduellement augmenté jusqu'à 216 $m^3/h$ (17 mars) en fonction des températures recherchées dans la masse de compost.

Les températures et les taux d'oxygène du compost ont été enregistrés au cours des essais de compostage en réacteur. Les teneurs en $CO_2$, $NH_3$, $N_2$, $O_2$ ont été mesurées à quelques reprises à la sortie d'air du réacteur.

Le débit d'air introduit dans le réacteur, la perte de charge dans le compost, la masse et les températures du compost dans le réacteur sont mesurés en continu (à intervalle de 5 min.) et enregistrés par le système d'acquisition de données.

La masse du réacteur est également enregistrée de cette façon en plus d'être notée manuellement avant et après la vidange et le remplissage du réacteur. Les analyses de TEE, M.O., N, P et K dans les composts au jour 0, 9, 21 et 30 ont été réalisées pour établir le bilan du compostage pour l'eau, la matière solide, la matière organique, l'azote, le phosphore et le potassium après ces temps de compostage. Le fumier essoré le 15 février est le seul a avoir été suivi de façon détaillée de sa sortie de l'étable (fumier frais) jusqu'à la sortie du réacteur après 30 jours. Le bilan complet de la chaîne de gestion par compostage en réacteur a été établi pour ce fumier. Cette méthode suppose que la perte de masse dans la couche repère de compost est la même que pour l'ensemble du réacteur.

#### 6.4.4.3 Compostage en tas de la fraction solide du fumier essoré (sans utilisation des réacteurs)

Un essai de compostage en tas dans l'entrepôt a été effectué avec le fumier essoré (sans compostage préalable en réacteur). Ces essais de compostage se sont réalisés entre le 24 février et le 8 mars 1993. L'objectif principal de cet essai était de clarifier l'intérêt de recourir à une étape de compostage accélérée avec aération forcée (compostage en réacteur), comme mode global de gestion du fumier à la ferme,en comparaison avec le compostage en tas de fumier essoré. Un thermocouple a été placé au centre du tas pour mesurer l'évolution des processus de compostage. Le compost a été échantillonné 12 jours plus tard pour des fins de caractérisation; ce compost a été comparé à un compost de 9 jours de rétention en réacteur.

## 6.5 RÉSULTATS

### 6.5.1 ANALYSES DU FUMIER

Le tableau 6.1 présente les caractéristiques du fumier frais (moyenne de trois répétitions) comprenant les fèces, l'urine et la litière.

**TABLEAU 6.1 : CARACTÉRISTIQUES DU FUMIER FRAIS**

| | MVA b.h. (kg/m³) | TEE b.h. (%) | M.O. b.s. (%) | Ntot b.s. (%) | Ptot b.s. (%) | Ktot b.s. (%) | C/N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| fumier frais | 1070 | 84,1 | 84,7 | 3,55 | 0,80 | 3,63 | 13,7 |

La teneur en eau b.h. du fumier est de 84,1 %, ce qui est trop élevé pour envisager le compostage du fumier sans écoulement de liquide. On observe qu'une fraction du liquide n'est pas absorbée par la litière au dalot. Cette fraction de liquide non absorbée est variable dans le dalot à la ferme (voir chapitre 3).

Le C/N du fumier est de 13,7, ce qui implique des conditions favorables aux pertes d'azote par volatilisation. Les concentrations d'azote, de phosphore et de potassium du fumier se rapprochent des valeurs présentées par Robert (1992) et par le CRIQ.

L'écurage quotidien du fumier de 40 u.a. a permis de mesurer une masse quotidienne moyenne de 2 464 kg de fumier, soit l'équivalent de 61,6 kg de fumier/u.a.-jour pour 2,3 m³ de fumier; ces valeurs correspondent à une densité de 1,07. La masse de litière utilisée quotidiennement est de 2,7 kg/u.a.-jour, donc la masse quotidienne de déjection animale à la ferme Berthely est évaluée à 58,9 kg/u.a.-j (fèces + urine). Cette valeur est plus élevée que celle retenue comme hypothèse de travail et présentée au chapitre 1 (49 kg/u.a.-j).

Les caractéristiques suivantes ont été retenues pour le calcul de la TEE théorique du fumier :

- TEE b.h. de la paille : 17,8 % (1,55 kg/u.a.-j)
- TEE b.h. de la sciure : 25,6 % (0,40 kg/u.a.-j)
- TEE b.h. de la ripe : 12,4 % (en sac) (0,23 kg/u.a.-j)
  20,5 % (en vrac) (0,54 kg/u.a.-j)

- TEE b.h. des fèces : 84 %
- TEE b.h. des urines : 96 %
- Rapport massique fèces/urine de 75/25

La TEE b.h. théorique du fumier ainsi calculée est de 84,0 %. Ce résultat nous permet d'affirmer que les valeurs des caractéristiques des matériaux utilisées en hypothèses sont vérifiées et que, même si la quantité de déjections (fèces + urine) varie, le calcul de la TEE du fumier (fèces + urine + litière) génère des valeurs comparables à celles mesurées sur la ferme.

## 6.5.2 ESSORAGE DU FUMIER

### 6.5.2.1 Fonctionnement général et observations

Au cours d'une même période d'essorage, la teneur en eau b.h. du fumier essoré varie de 72 à 84 %. Cet écart s'explique par l'hétérogénéité du fumier qui, lors de son passage dans l'essoreuse, comprend tantôt une proportion importante d'urine, tantôt une proportion importante de paille. La teneur en eau moyenne du fumier essoré est de 75 %. Cette TEE apparaît être la limite supérieure autorisant un compostage sans écoulement dans le réacteur.

Les caractéristiques du fumier essoré dépendent d'un ensemble de facteurs dont le principal est la nature même de l'intrant. L'équipement utilisé à la ferme devait initialement fonctionner avec du fumier composé de paille longue. Cependant, pour le bon fonctionnement de l'essoreuse, la paille a dû être hachée pour la durée des essais.

Le hachage de la paille dans l'étable permet d'obtenir un fumier plus homogène dans la trémie d'alimentation de l'essoreuse, ce qui améliore le rendement de l'essorage. De plus, le hachage de la paille réduit le risque de bris mécaniques et le fumier s'écoule mieux de la trémie d'alimentation, à la vis essoreuse.

Pour un volume initial de 2,3 $m^3$ de fumier frais dans la trémie, le volume moyen de liquide essoré est de 1,4 $m^3$. Ce dernier représente 61 % du volume du fumier frais. Le volume quotidien de fumier essoré a été mesuré dans le réacteur lors du remplissage. Environ 2,7 $m^3$ de fumier essoré non compacté a été ajouté quotidiennement dans le réacteur. Ce volume ne représente pas l'espace quotidien

nécessaire pour entreposer le fumier essoré dans le réacteur puisque ce dernier est rapidement comprimé par l'addition de matériel lors des remplissages subséquents.

Le temps moyen nécessaire pour essorer 2 464 kg (2,3 $m^3$) de fumier frais est de 117 minutes et correspond à un débit de fumier frais (à l'entrée de l'essoreuse) de 21 kg/min (1,26 t/h) et à 12,3 kg/min de liquide d'essorage extrait du fumier. Le temps nécessaire pour remplir la trémie d'alimentation est de 11 minutes alors que la durée totale de l'écurage est de 20 minutes. Pour obtenir des temps d'essorage et d'écurage similaires, un débit d'essorage de 4,6 $m^3$/h serait nécessaire pour essorer 2 464 kg par jour de fumier frais; cela représente un rendement 3,5 fois supérieur à celui de l'équipement utilisé.

Le type d'équipement de séparation utilisé a présenté des performances d'essorage variables; la fiabilité du système d'alimentation n'a pas été démontrée. À notre connaissance, il n'existe pas d'équipement d'essorage adapté à la ferme qui produit, à des coûts abordables, de telles performances (77 kg/min. ou encore 4,6 t.m./h).

Les 15 essorages effectués lors de la période de rodage de l'essoreuse nous ont permis de mesurer la proportion massique de chacune des fractions (fumier essoré et liquide d'essorage). En moyenne, 41,5 % (écart type de 7,23) de la masse totale de fumier frais se retrouve dans le fumier essoré.

### 6.5.2.2 Analyses du fumier essoré et du liquide d'essorage

Le tableau 6.2 présente les caractéristiques du fumier frais, du fumier essoré et du liquide d'essorage. Ces résultats représentent la moyenne de trois essais d'essorage.

**TABLEAU 6.2 : CARACTÉRISTIQUES DU FUMIER FRAIS, ESSORÉ ET DU LIQUIDE D'ESSORAGE**

| Caractéristiques | Fumier frais | Fumier essoré | Liquide d'essorage |
|---|---|---|---|
| Volume ($m^3$) | 2,3 | 2,7 [1] | 1,4 |
| Masse (kg) | 2464 | 1025 | 1439 |
| TEE b.h. (%) | 84,1 | 75,1 | 92,5 |
| M.O. b.s. (%) | 84,7 | 89,8 | 47,8 |
| Ntot b.s. (%) | 3,55 | 2,25 | 7,07 |
| Ptot b.s. (%) | 0,80 | 0,49 | 1,56 |
| Ktot b.s. (%) | 3,63 | 1,98 | 9,49 |
| C/N | 13,7 | 23,3 | 3,9 |
| Porosité de drainage (%) | 11,1 | 44,3 | - |
| Porosité effective (%) | 17,4 | 69,0 | - |

1) fumier essoré non compacté

À partir du tableau 6.2, nous avons calculé la proportion massique de chacun des éléments qui se retrouvent dans le fumier essoré et dans le liquide d'essorage. Ces valeurs sont présentées au tableau 6.3.

## TABLEAU 6.3 : PROPORTIONS MASSIQUES DU FUMIER ESSORÉ ET DU LIQUIDE D'ESSORAGE

| Paramètre | Proportion massique (%) | |
|---|---|---|
| | Fumier essoré | Liquide d'essorage |
| Matière totale | 41,6 | 58,4 |
| Eau | 36,6 | 63,4 |
| Matière sèche | 70,5 | 29,5 |
| Matière organique | 81,8 | 18,2 |
| Azote | 43,2 | 56,8 |
| Phosphore | 42,9 | 57,1 |
| Potassium | 33,1 | 66,9 |

À la lumière de ces résultats (tableaux 6.2 et 6.3), les aspects suivants méritent une attention particulière :

- 58 % de la masse du fumier se retrouve dans la fraction liquide du fumier essoré; cette masse correspond à 61 % du volume de fumier.
- 30 % de la masse sèche du fumier frais se retrouve dans le liquide d'essorage.
- Le liquide d'essorage a une siccité de 7,5 % et 18 % de la matière organique initialement contenu dans le fumier s'y retrouve. Ces teneurs en masse sèche dans la fraction liquide pourraient créer des problèmes lors de l'entreposage de ce liquide (difficulté à pomper le liquide, production de mauvaises odeurs, formation d'un dépôt dans les purots).
- Si on exprime les données du tableau 6.2 sur une base de masse humide (en kg/tonne de fumier humide), on constate que les concentrations en azote et en phosphore des trois matériaux (fumier frais, fumier essoré et liquide d'essorage) sont équivalentes; la concentration en potassium du liquide d'essorage est cependant plus élevée que celle des fumiers frais et essorés.

- L'essorage du fumier fait augmenter le rapport C/N de la fraction solide du fumier essoré, ce qui est favorable à un compostage subséquent.

- Près de 57 % de la masse d'azote et de phosphore contenus dans le fumier frais se retrouve dans la fraction liquide; ceci correspond à la proportion de masse de matière totale (58 %) retrouvée dans le liquide pour ces éléments.

- La proportion massique de potassium retrouvée dans le liquide d'essorage est encore plus grande que la proportion d'azote ou de phosphore (67 %).

- Le volume de liquide essoré est équivalent à 584 L/t.m. de fumier frais.

- L'essorage du fumier fait augmenter la porosité du fumier. La porosité effective moyenne du fumier essoré est de 69,0 % (à 75,1 % de TEE b.h.) et de 17,4 % (à 84,1 % de TEE b.h.) pour le fumier frais.

Un des problèmes observé avec l'essoreuse utilisée concerne la masse de matière solide qui n'est pas retenue dans le fumier essoré. À titre d'exemple, l'essorage à 75 % de TEE, de 2 464 kg de fumier frais à une TEE de 84,1 %, produirait 897 kg d'eau qui constituerait le liquide d'essorage pour un cas idéal. Ceci représente 542 kg de liquide d'essorage en moins que la masse obtenue lors des essais, soit 1 439 kg. Cette différence de masse de liquide se traduirait par une réduction d'environ 38 % du volume nécessaire à l'entreposage des liquides d'essorage à la ferme Berthely. Conséquemment, une augmentation de 53 % de la masse de fumier essoré (1 567 kg vs 1 025 kg) serait ainsi obtenue. Dans ces conditions, la masse de liquide d'essorage représenterait 36 % de la masse de fumier frais (contre 61 % avec un essorage peu efficace). L'utilisation d'un tamis de mailles plus fines permettrait une meilleure récupération de la fraction solide et permettrait d'obtenir un essorage plus adapté à une gestion optimale des fumiers.

## 6.5.3 ESSAIS DE COMPOSTAGE EN RÉACTEUR

### 6.5.3.1 Observation sur le fonctionnement mécanique du réacteur

En général, l'ouverture et la fermeture du couvercle du réacteur ainsi que la répartition du matériel dans le réacteur se sont avérées efficaces et simples à opérer. A l'occasion le fumier qui venait juste d'être déchargé dans le réacteur a du être déplacé manuellement pour assurer une meilleure distribution. Par contre, la structure en bois (contre-plaqué recouvert d'une peinture époxy) s'est révélée fragile. Les températures et l'humidité élevées de l'air ont entraîné une dégradation rapide de la surface interne des parois. L'écoulement de liquides dans le fond du réacteur par réessuyage du compost a été très minime et s'est produit principalement en début de compostage lors du remplissage initial.

La vidange des réacteurs s'est avérée problématique. Après l'ouverture des fourches, il a été impossible de faire descendre le compost du réacteur vers les vis de vidange en raison de la formation d'une couche rigide (formation d'un pont). Pour régler ce problème, la quantité de paille, la teneur en eau du fumier essoré et le temps de rétention du compost dans le réacteur auraient pu être modifiés. Dans le cas où le compost dans le réacteur serait plus friable et moins pris en bloc, l'écoulement du compost dans le fond du réacteur pourrait être possible. En fonction du système implanté et des caractéristiques intrinsèques du fumier de bovins laitiers, ces modifications ne nous sont pas apparues réalistes et logiques. En conséquence, ce problème n'a pas été résolu. Une reconfiguration du fond du réacteur pourrait peut-être permettre l'écoulement du compost par le fond du réacteur. L'enlèvement du mur séparateur, une inclinaison plus élevée du V dans le fond du réacteur, l'installation de panneaux dont la surface exposée au compost possède un coefficient de friction plus faible que celle du contre-plaqué couvert d'époxy et le déplacement des fourches, au-dessus du point de rencontre du mur et de la paroi en V au fond du réacteur seraient autant de solutions réalistes à envisager pour régler ce problème. Le manque de temps et d'argent n'a pas permis de mettre à l'essai ces modifications.

### 6.5.3.2 Déroulement des processus de compostage

#### 6.5.3.2.1 Oxygénation du compost

Puisque le compost n'est pas brassé et homogénéisé durant son séjour dans le réacteur, il peut se former des chemins préférentiels de circulation d'air durant cette période; les parties plus sèches ayant tendance à laisser passer l'air plus facilement et à s'assécher encore plus rapidement. Ce phénomène a été observé lors des essais, principalement avec l'air soufflé par le plénum. L'air semble mieux réparti lorsqu'il est dirigé dans les gaines des parois du réacteur.

Pour diminuer les températures du compost et favoriser les processus de compostage, le débit d'air a été augmenté graduellement après l'élévation initiale de la température du compost dans le réacteur.

Le débit d'air requis a été ajusté en fonction de la température et du taux d'oxygène lacunaire dans la masse de compost. En début de compostage, le débit d'air injecté dans le réacteur était de 92 $m^3/h$. Par la suite, le débit d'air a été augmenté graduellement à 139 $m^3/h$ pour diminuer la température du compost et procurer les conditions optimales aux microorganismes (60 °C, Jeris 1973). La perte de charge causée par la circulation de l'air dans la masse de compost a été de 0,25 à 0,50 kPa (1 à 2 po d'eau) au cours des essais. Le débit d'air de 100 $m^3/h$ par réacteur correspond approximativement à 9 $m^3/(h$ -t.m. hum.) ou encore à environ 12 $m^3/(h$-t.m. sec) (compost à 75 % de TEE).

Pour ces taux d'aération, la teneur en oxygène dans les espaces lacunaires s'est maintenue entre 10 et 18 %. Les exigences concernant l'oxygénation du compost ont été respectées tout au cours des essais, puisque le taux d'oxygène du compost est toujours supérieur à 5 % (Mustin, 1987). La teneur en oxygène est plus élevée dans le bas du réacteur. Lorsque la ventilation ne fonctionne pas, la teneur en oxygène, en un endroit donné baisse rapidement; de 1 à 2 % par minute. Pour contrecarrer cette variation, le temps d'arrêt de la ventilation a été d'au maximum 10 minutes tout au cours des essais.

#### 6.5.3.2.2 Caractérisation des gaz à la sortie du réacteur

Nous avons procédé à la caractérisation des gaz à la sortie du réacteur au cours des essais. Le taux d'oxygène moyen, mesuré à trois reprises, dans l'air sortant du

réacteur est de 15 %. Tout au cours des essais de compostage, des quantités non négligeables de vapeur d'eau, de gaz carbonique et d'ammoniaque se sont dégagées du compost dans le réacteur. Des concentrations de gaz carbonique maximales de 4 % ont été mesurées dans l'air sortant du réacteur. La concentration naturelle de l'air est de 0,03 % (Hellickson, 1983).

Si les problèmes d'odeur ne se sont pas avérés importants, en contrepartie, la présence d'ammoniaque dans l'air ambiant de l'annexe à compostage a nécessité l'installation d'un ventilateur pour évacuer l'air vicié hors de l'annexe à compostage. Les normes de santé et sécurité au travail précisent des concentrations maximales d'ammoniaque dans l'air. La norme de travail continu (8 hrs par jour) accepte un taux moyen de 25 ppm avec des pointes pouvant aller jusqu'à 35 ppm (comm. pers, Air liquide inc.). A 500 ppm, il y a un fort danger pour la vie et la santé humaine (séquelles irréversibles). Le seuil de détection pour l'homme est de 5 ppm.

Les concentrations en ammoniaque à différents endroits ont été mesurées à l'aide de tubes Dragger. Avant l'installation du ventilateur dans l'annexe à compostage, des concentrations de 75 ppm de $N\text{-}NH_3$ ont été mesurées dans la pièce avant l'ouverture du réacteur. Après 21 jours de compostage en réacteur, plus de 150 ppm d'ammoniaque sont retrouvés dans l'air à la sortie du réacteur et entre 55 et 60 ppm après 30 jours de compostage.

#### 6.5.3.2.3 Évolution des températures

La figure 6.7 présente les températures dans le réacteur au cours de la période d'essai et celles de l'air extérieur utilisé par l'oxygénation. Les températures thermophiles (>45 °C) sont atteintes très rapidement pour l'ensemble du compost. Lors des contrôles manuels de température, il a été remarqué que ces températures étaient généralement supérieures à celles obtenues par les thermocouples des parois. Une valeur maximale de 78 °C a ainsi été mesurée dans la masse de compost.

#### 6.5.3.2.4 Évolution des masses et des volumes

On retrouve au tableau 6.4 les réductions de volume et de masse après 9, 21 et 30 jours de compostage en réacteur. Ces taux de réduction ont été mesurés pour la totalité de la masse et du volume de compost dans le réacteur.

Plus le temps de compostage est long, plus les pertes de volume et de masse sont élevées. Pour un temps de compostage de 30 jours, la réduction du volume de compost dans le réacteur est de 23 %, ce qui correspond à une perte journalière moyenne de volume de 0,77 %/j. Le compostage en réacteur des fumiers, a permis de réduire la masse du compost à un taux d'environ 0,95 %/j. Ainsi, après 21 jours, la perte de masse est évaluée à 20,2 %. La masse volumique apparente sur une base humide (MVA b.h.) du compost est passée de 523 kg/m$^3$ après trois jours de compostage en réacteur à 503 kg/m$^3$ au jour 30.

**TABLEAU 6.4 : EFFETS DU COMPOSTAGE EN RÉACTEUR SUR LE VOLUME ET LA MASSE DU COMPOST**

| Temps de compostage | Taux de réduction (%) | |
|---|---|---|
| | Volume | Masse |
| 9 jours | 6,9 | 9,1 |
| 21 jours | 16,0 | 20,2 |
| 30 jours | 22,9 | 26,4 |

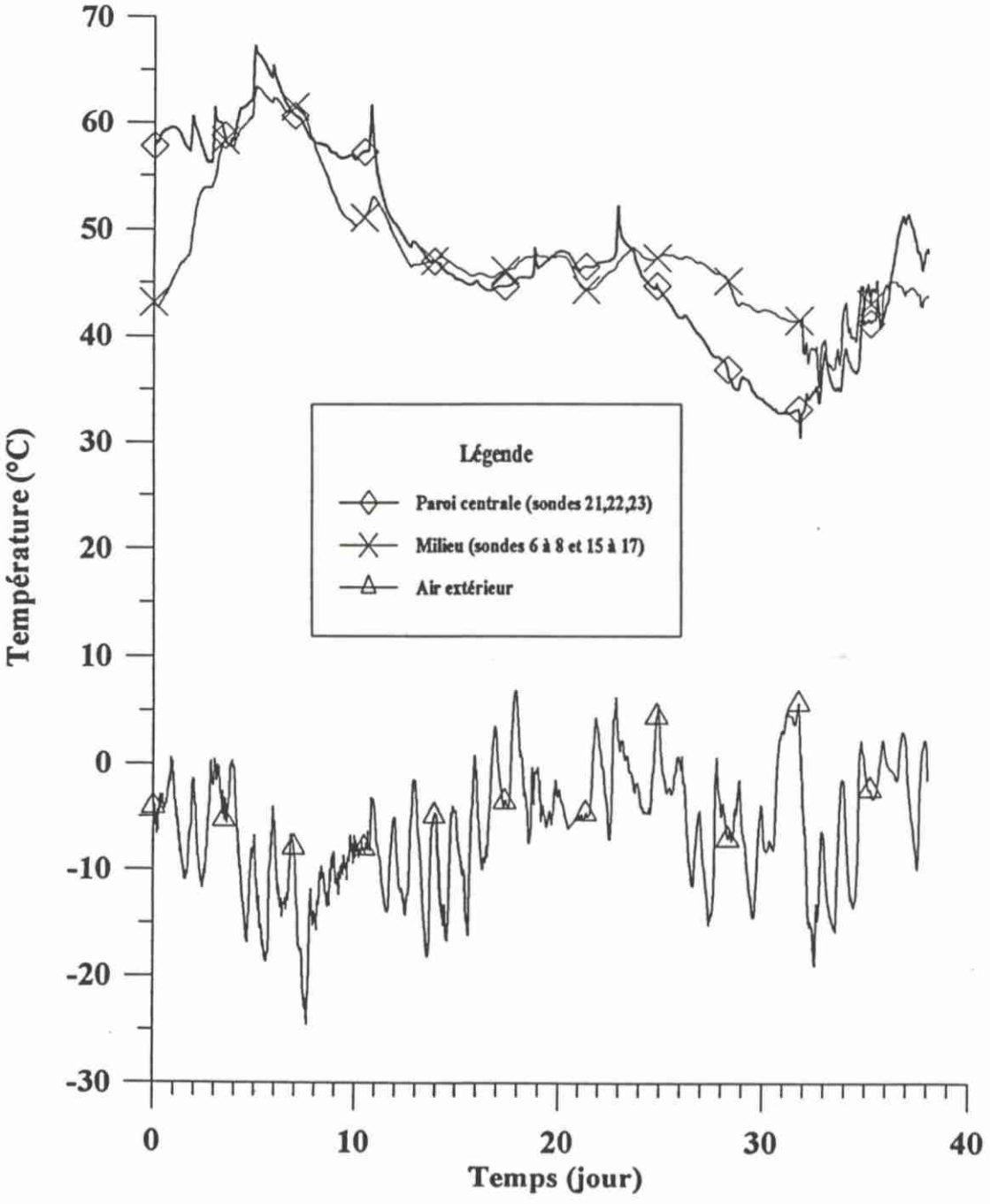



Figure 6.7 : Températures du compost dans le réacteur et de l'air extérieur

### 6.5.3.2.5 Évolution des caractéristiques des composts

Le tableau 6.5 présente les analyses de compost correspondant à différents temps de séjour dans le réacteur. Ces analyses représentent la moyenne de trois échantillons correspondant aux points d'échantillonnage indiqués à la figure 6.6.

**TABLEAU 6.5 : ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DU COMPOST EN RÉACTEUR**

| Caractéristique | Compost | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Jour 0 | Jour 9 | Jour 21 | Jour 30 |
| TEE b.h. (%) | 74,4 | 76,2 | 74,8 | 71,2 |
| M.O. b.s. (%) | 89,8 | 88,5 | 87,2 | 85,9 |
| Ntot b.s. (%) | 2,30 | 2,40 | 2,49 | 2,54 |
| Ptot b.s. (%) | 0,48 | 0,58 | 0,62 | 0,66 |
| Ktot b.s. (%) | 2,01 | 2,53 | 2,87 | 2,95 |
| C/N | 22,6 | 21,3 | 20,7 | 20,3 |
| pH | 8,04 | 8,43 | 8,34 | 8,02 |
| Taux de respiration (mg $O_2$/kg s.v.-h) | 4 090 | 3 422 | 1 971 | 1 711 |

De ce tableau, les points suivants sont à remarquer :

- La teneur en eau moyenne du compost de la couche repère n'a pas diminué au cours des trois premières semaines de compostage en réacteur. Après 30 jours, la TEE b.h. du compost est de 71,2 %.
- La teneur en matière organique et le rapport C/N ont diminué légèrement en cours de compostage.
- Les concentrations en azote total, phosphore total et potassium total, exprimées sur base sèche ont augmenté en cours de compostage; après 21 jours pour la couche repère, elles étaient respectivement de 8, 29 et 43 % plus élevées. L'augmentation

de la concentration en potassium dans des proportions supérieures à l'augmentation de la concentration en phosphore nous amène à penser qu'il y a eu apport de potassium dans la couche repère. Cet apport proviendrait de la migration de cet élément des couches de compost disposées au-dessus de la couche repère.

- En fonction de l'évolution des paramètres présentés au tableau 6.5, il devient difficile d'établir le temps de rétention optimal de compostage en réacteur. Il nous est impossible de se prononcer sur le temps minimal de compostage requis. Cette variable nous apparaît davantage influencée par des considérations pratiques dans le contexte de gestion des fumiers à la ferme.

- Après 30 jours de compostage, le matériel est beaucoup plus friable qu'au début. Son évacuation par le système de vis sans fin, le rend moins grossier et plus homogène que le fumier frais.

- Après un séjour dans le réacteur de 30 jours ou plus, l'entreposage du compost directement sur le sol, sans drainage naturel du compost et écoulement de lixiviats serait envisageable à condition de couvrir le compost.

#### 6.5.3.2.6 Bilan du compostage en réacteur

En raison des problèmes reliés à la vidange du réacteur, l'établissement de façon précise du bilan est rendu plus difficile. Le procédé n'ayant pas été opéré en continu, les pertes massiques de matières totales, d'eau, de matière sèche, de matière organique, d'azote, de phosphore et de potassium, après 21 jours de compostage, sont présentées au tableau 6.6, pour la couche repère de compost seulement. Ces pertes sont calculées à partir des mesures et analyses du fumier essoré le 15 février. Ils ne correspondent pas aux valeurs de bilan d'essorage calculées à partir des caractéristiques moyennes.

## TABLEAU 6.6 : PERTES MASSIQUES DE LA COUCHE REPÈRE APRÈS 21 JOURS DE COMPOSTAGE EN RÉACTEUR

| Perte massique de la couche repère au jour 21 par rapport au fumier essoré au jour 0 (%) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mat. tot. | Eau | Mat. sec. | MO | Azote | Phosphore | Potassium |
| 20,2 | 19,8 | 21,6 | 23,8 | 15,1 | - 1,0 | - 11,9 |

- La masse de matière totale, d'eau, de matière sèche et de matière organique b.s. du compost diminue d'environ 20 % après 21 jours de compostage.

- Pour une période de compostage de 21 jours en réacteur, les pertes d'azote sont estimées à 15,1 % et correspondent à 0,72 %/j de l'azote contenu dans le fumier essoré. Par contre, on ne peut évaluer les pertes en azote à chacune des étapes de la chaîne de gestion du fumier (liquide d'essorage + fumier essoré et composté), car on ne connaît pas l'ampleur de ces pertes durant l'entreposage du liquide d'essorage ou du compost.

- Les pertes en P et K sont nulles en cours de compostage en réacteur puisque la production de lixiviats est nulle.

- Après 21 jours de compostage, on estime la perte de masse fraîche attribuable à l'évaporation de l'eau à 73 %, et à 27 % celle attribuable à la perte de matière sèche.

### 6.5.3.2.7 Récupération de l'azote et de l'énergie

La récupération de l'azote à la sortie du réacteur et de l'énergie dégagée par le compost représentaient deux alternatives envisageables pour augmenter la rentabilité du procédé. L'évaluation économique de ces alternatives a été faite à partir des bilans obtenus avec la couche repère de compost (cf tableau 6.6).

Pour chaque cycle de 21 jours de compostage en réacteur, la masse d'azote perdue dans l'air à la sortie du réacteur est d'environ 35 kg. Pour une année complète (365 jours), une masse totale d'azote d'environ 625 kg serait récupérable à la ferme Berthely. À 83 ¢/kg d'azote, un montant annuel maximal de 500 $ serait ainsi récupérable des réacteurs, si le taux de récupération est de 100 %. Cette fraction

d'azote récupérable représente 6 % de l'azote contenu initialement dans le fumier à la sortie de l'étable. L'azote qui serait perdu avant le compostage (à l'étable ou à l'essorage) ou après (à l'entreposage ou à l'épandage) est techniquement difficile à capter et à récupérer.

Lors des essais, l'énergie dégagée par le compost dans les 21 premiers jours de compostage sous forme de vapeur humide représente une puissance de 0,2 kW/t.m. de fumier essoré (ou encore 2,3 kW/réacteur). Annuellement, cette énergie représente une économie potentielle de 1 200 $ (à 0,06 $/kW-h) pour la ferme Berthely (ou encore 0,69 $/t.m. de fumier).

La récupération d'énergie dégagée par le compost peut entraîner des problèmes. L'air qui se dégage du réacteur est chaud et très humide. De plus, des quantités non négligeables de gaz corrosifs ($H_2S$, $NH_4$...) se dégagent du compost et pourraient endommager les équipements de récupération de chaleur. Le taux de récupération des échangeurs de chaleur se situe généralement sous les 50 % généralement selon le personnel technique du CRIQ. Finalement, récupérer l'énergie est une chose et le faire de façon appropriée dans le contexte de la ferme en est une autre.

### 6.5.4 ESSAIS DE COMPOSTAGE DANS L'ENTREPÔT À FUMIER SANS UTILISATION DES RÉACTEURS

Un essai de compostage en tas dans l'abri à fumier a été réalisé au mois de février avec du fumier essoré. Environ 1 $m^3$ de fumier essoré a été mis en tas conique (hauteur $\approx$ 1,1 m). La température de ce fumier avant l'essorage (dans la trémie) était de 5 °C. Deux jours après l'essorage et la mise en tas du fumier essoré, la température interne du tas atteignait 64 °C. La figure 6.8 présente les températures au centre du tas conique de fumier essoré disposé dans l'entrepôt en fonction du temps de compostage. Il est à remarquer que des circonstances incontrôlables ont provoqué le recouvrement du tas de compost par du fumier frais à partir du jour 14.

Le déroulement de ces essais ne nous a pas permis d'effectuer des mesures de masse et de volume de compost. Les analyses de fumier essoré et de ce même fumier composté en tas dans l'abri sur une période de 12 jours sont présentées au tableau 6.7.

## TABLEAU 6.7 : ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DU COMPOST DANS L'ENTREPÔT

| Compost | TEE b.h. (%) | MO b.s. (%) | Ntot b.s. (%) | Ptot b.s. (%) | Ktot b.s. (%) | pH | C/N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Jour 0 | 75,2 | 90,0 | 2,18 | 0,51 | 1,96 | 7,94 | 24,0 |
| Jour 12 | 76,1 | 88,2 | 2,51 | 0,66 | 2,69 | 8,40 | 20,4 |

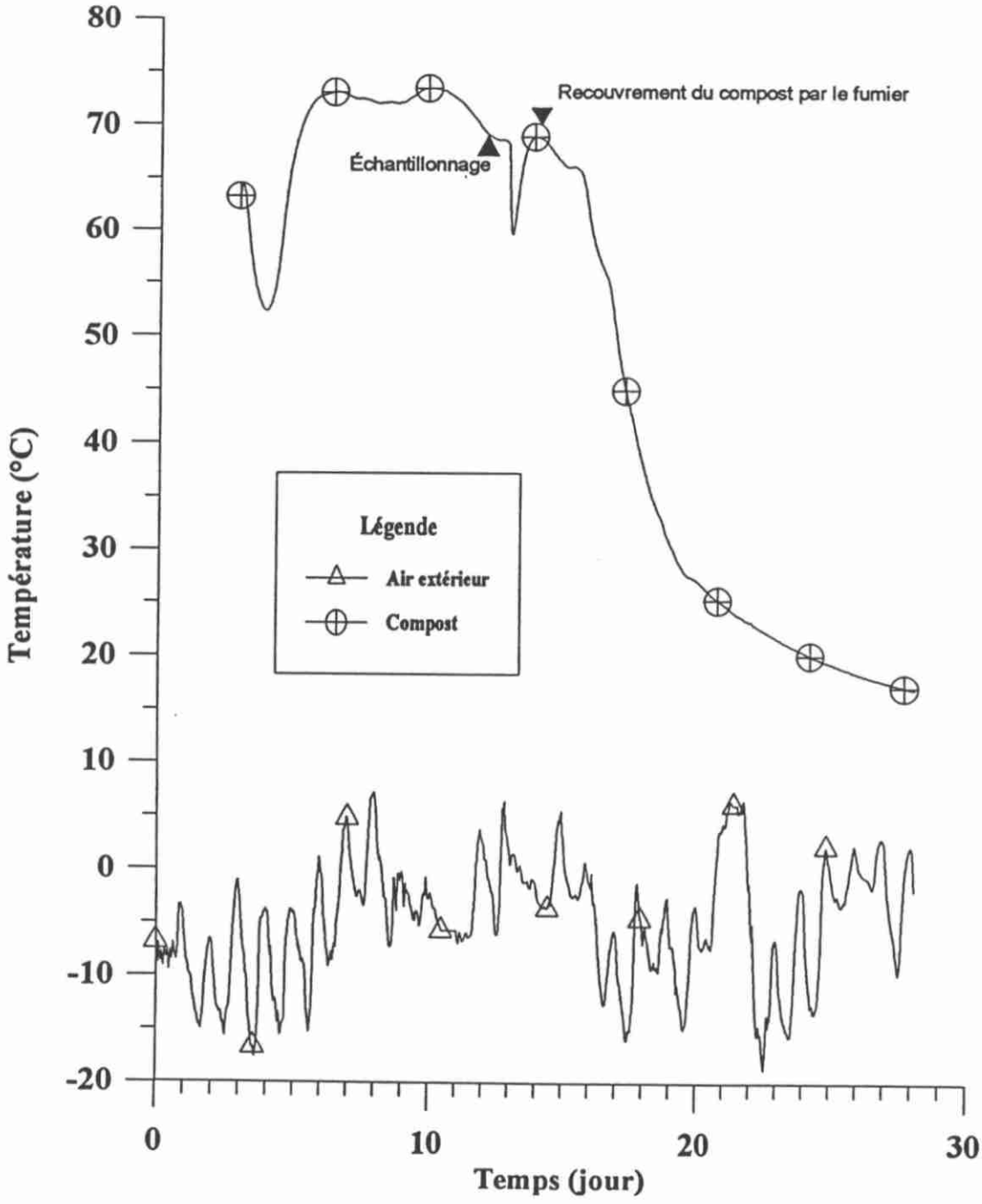



Figure 6.8 : Température du compost en tas dans l'entrepôt

De ces analyses nous pouvons dégager les observations suivantes pour 12 jours de compostage en tas :

- L'essorage du fumier a permis d'obtenir les conditions propices au compostage (même en période hivernale) puisque suite à cette opération, une élévation rapide de la température est observée dans le tas.
- La teneur en eau du compost a légèrement augmenté ($\approx$ 1 %).
- La teneur en matière organique a légèrement diminué ($\approx$ 2 %).
- Le rapport C/N est passé de 24 à 20,4.
- Le pH a augmenté légèrement de 7,96 à 8,40.
- Les concentrations en azote, phosphore et potassium ont augmenté durant la période d'essai.
- Les températures du tas de compost ont diminué après le jour 14 et correspondent au recouvrement accidentel du compost avec le fumier frais.
- L'augmentation de la TEE du compost et l'augmentation de la concentration en potassium dans une proportion supérieure à l'augmentation de la concentration en phosphore démontrent qu'il y a écoulement de liquide des couches supérieures vers la partie inférieure du tas quelques jours suivant la mise en tas. On ne peut donc pas affirmer qu'il n'y aura pas de lixiviat produit en cours de compostage pour du fumier essoré à une TEE égale ou supérieure à 75 %.
- Après 12 jours de compostage en tas, les caractéristiques du compost s'apparentent à celles du matériel composté en réacteur après une période de 9 à 30 jours. En comparant les caractéristiques du compost dans l'entrepôt et celui issu du réacteur, le compostage en réacteur se justifie difficilement.

L'essorage du fumier et son compostage subséquent directement en tas s'avèrent être une technique intéressante. D'autres essais à la ferme sur une plus longue période de temps devraient être réalisés pour démontrer les avantages et les contraintes de cette avenue.

## 6.5.5 BILAN DE LA CHAÎNE DE GESTION PAR COMPOSTAGE

### 6.5.5.1 Bilan du compostage en réacteur par rapport au fumier frais

En considérant que les caractéristiques du fumier frais représentent une valeur de 100 %, nous avons calculé leur valeur résiduelle se retrouvant dans le liquide d'essorage et les composts de 0 (fumier essoré), 9, 21 et 30 jours pour les caractéristiques suivantes : masse de matière totale, d'eau, de matière sèche, de matière organique, d'azote, de phosphore et de potassium. Ces valeurs ne sont valides que pour l'essorage du 15 février. Les résultats sont présentés au tableau 6.8. La figure 6.9 résume le bilan de la chaîne globale de gestion des fumiers par compostage en réacteur pour une période de 21 jours.

**TABLEAU 6.8 : VALEUR RÉSIDUELLE MASSIQUE PAR RAPPORT AU FUMIER FRAIS**

| Matériel | Valeur résiduelle massique par rapport au fumier frais (%) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mat.tot. | Eau | Mat.sec. | MO | N | P | K |
| Liquide d'essorage | 51,9 | 57,2 | 25,5 | 16,2 | 49,6 | 53,0 | 59,7 |
| Compost jour 0 (fumier essoré) | 48,1 | 42,8 | 74,5 | 83,8 | 50,4 | 47,0[1] | 40,3[1] |
| Compost jour 9 | 43,7 | 40,2 | 61,3 | 68,0 | 43,3 | 47,0[1] | 41,9[1] |
| Compost jour 21 | 38,3 | 34,3 | 58,4 | 63,4 | 42,8 | 47,5[1] | 45,1[1] |
| Compost jour 30 | 35,4 | 30,2 | 61,6 | 66,3 | 46,1 | 53,5[1] | 48,9[1] |

1) Erreur possible au niveau du bilan dû à la migration de ces éléments (P et K) des couches supérieures vers les couches inférieures dans le réacteur.

Nous constatons que :

- Après 9, 21 et 30 jours de compostage, l'azote se retrouve en plus grande quantité dans le liquide d'essorage que dans le compost. On ne connaît cependant pas l'ampleur des pertes d'azote dans le liquide entreposé.

- Après 30 jours de compostage, les concentrations en azote, phosphore et potassium du compost n'atteignent pas les concentrations mesurées dans le fumier frais (voir tableau 6.2).

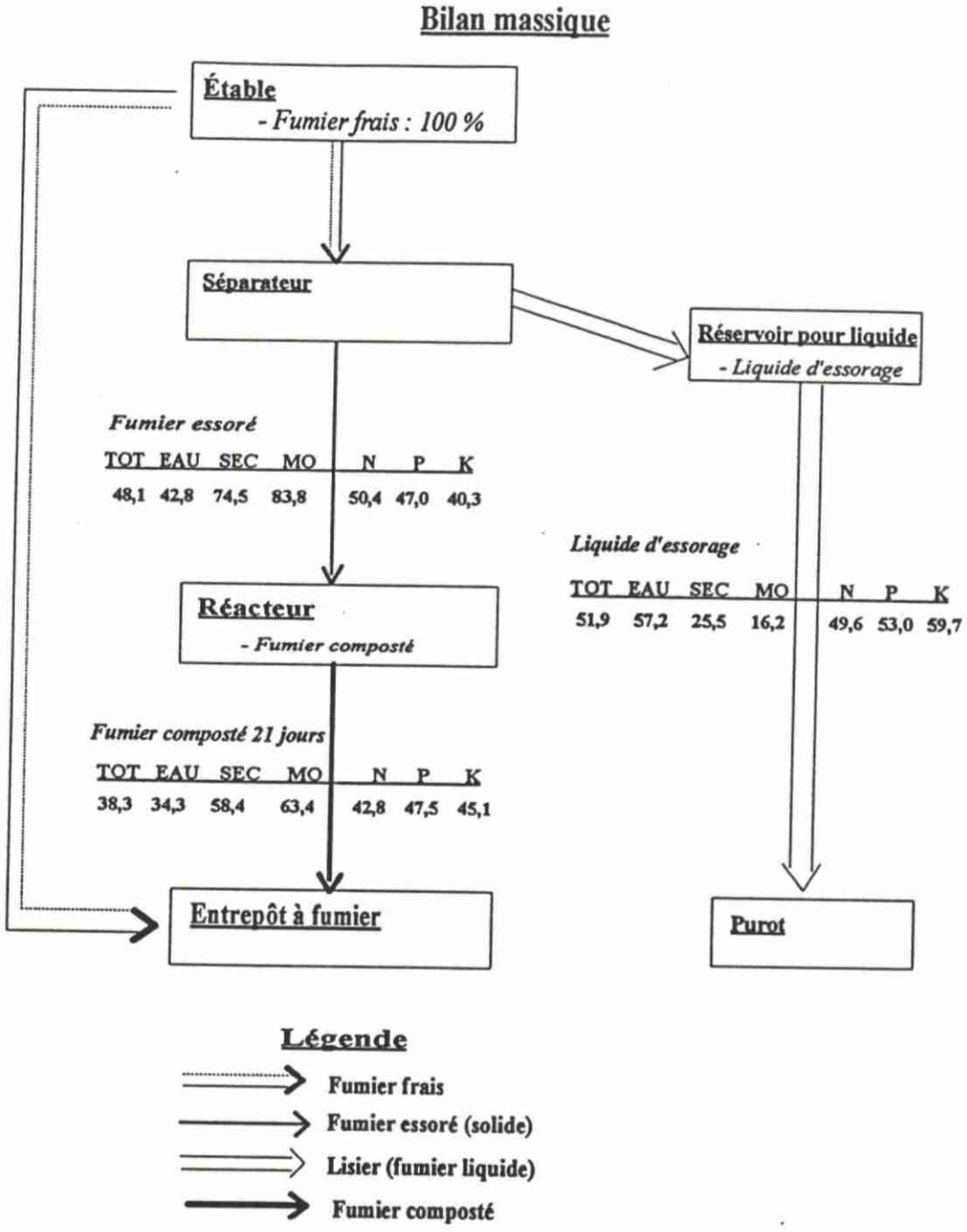



Figure 6.9 : Bilan global de la chaîne de gestion des fumiers à la ferme Berthely

### 6.5.5.2 Bilan global de l'essorage et du compostage en réacteur par rapport au fumier frais

Pour la masse de matière totale, d'eau, de matière sèche, de matière organique, d'azote, de phosphore et de potassium, le bilan global de la chaîne de gestion des fumiers (fumier essoré + liquide d'essorage) est établi par rapport au fumier frais. Ces valeurs sont présentées au tableau 6.9. Pour cet exercice, nous considérons que les pertes sont nulles durant l'entreposage du liquide d'essorage.

**TABLEAU 6.9 : VALEUR RÉSIDUELLE DANS LE COMPOST ET LE LIQUIDE D'ESSORAGE PAR RAPPORT À L'ENSEMBLE DES FUMIERS DE LA FERME**

| Temps de compostage | Valeur résiduelle massique dans le compost et le liquide d'essorage par rapport au fumier frais (%) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mat tot. | Eau | Mat. sec. | MO | N | P | K |
| après 21 jours | 90,2 | 91,5 | 83,9 | 79,6 | 92,4 | 100 | 100 |
| après 30 jours | 87,3 | 87,4 | 87,1 | 82,5 | 95,7 | 100 | 100 |

Après 21 jours de compostage en réacteur, le volume de fumier à entreposer diminue de 16 %, mais le volume du liquide d'essorage à entreposer est supérieur à celui habituellement prévu pour l'entreposage des liquides par drainage naturel du fumier. Lors de l'essorage mécanique du fumier frais, 61 % du volume se retrouve dans la fraction liquide. Pour le dimensionnement des structures d'entreposage des liquides générés par l'empilement sous la montée d'écureur du fumier, 25 % du volume de fumier frais est habituellement calculé (CPVQ, 1992).

Globalement, les opérations d'essorage et de compostage en réacteur de la fraction essorée occasionnent une réduction d'environ 10 % de la masse de fumier à gérer (liquide d'essorage + fumier composté), après un temps de compostage de 21 jours. Ces opérations occasionnent l'entreposage d'un volume de liquides supérieur à la gestion conventionnelle, mais permettraient en principe de réduire le volume de fumier à entreposer de 40 % si la fraction solide essorée ne requiert pas de structure d'entreposage (voir tableau 6.2).

### 6.5.5.3 Évaluation de la gestion par essorage/compostage des fumiers entièrement sous forme solide

Comme l'élévation de la température est importante et que l'évaporation est considérable lors du compostage, nous avons vérifié certaines hypothèses concernant la séparation du fumier et la gestion des liquides d'essorage. Pour plusieurs agriculteurs, il serait intéressant de gérer complètement sous forme solide les fumiers par compostage. Ce mode de traîtement impliquerait qu'aucune structure d'entreposage des liquides n'est nécessaire. Le liquide d'essorage serait mélangé avec le compost à la sortie du réacteur.

Pour ce, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- TEE du liquide d'essorage : 92,5 %;
- Fraction massique de fumier frais qui se retrouve dans le liquide d'essorage : 52 %;
- Fraction massique du fumier frais qui se retrouve après 21 jours de compostage en réacteur dans le compost : 38 % (TEE de 74,8 %);
- Fraction massique du fumier frais qui se retrouve après 30 jours de compostage en réacteur dans le compost : 35 % (TEE de 71,2 %).

La réintroduction du volume de liquide d'essorage issu d'un essorage quotidien dans les composts de 21 et 30 jours respectivement, nous permettrait (par calcul théorique) d'obtenir un mélange avec une TEE b.h. de 85 % pour le compost de 21 jours et de 83,9 % pour le compost de 30 jours. À ce titre, la gestion totale des fumiers par compostage sans avoir à gérer de liquide apparaît difficilement réalisable.

### 6.5.6 COÛTS D'UN RÉACTEUR À COMPOST

Le système de compostage implanté à la ferme Berthely comprend deux types d'équipements principaux : une essoreuse à fumier et deux réacteurs à compost. Ces équipements ont été installés dans une annexe à compostage adjacente à l'étable et à l'entrepôt à fumier. La construction de l'annexe représente un coût de 25 000 $.

Le prix de l'essoreuse (essoreuse + trémie d'alimentation) implantée à la ferme est de 15 000 $ (Wic inc., 1992). Ce coût représente un minimum compte tenu du faible niveau de fiabilité et des améliorations nécessaires au bon fonctionnement de l'équipement sur une période de temps prolongée.

La construction d'un réacteur à compost incluant le système de ventilation a nécessité des déboursés de 28 800 $. Les opérations de remplissage et de vidange de ce type de réacteur nécessitent l'utilisation de plusieurs équipements. Un convoyeur de montée, un convoyeur de répartition pour l'alimentation du fumier essoré, une unité hydraulique pour l'ouverture et la fermeture des fourches et des trappes de sortie et un système de vidange à deux vis dans le fond du réacteur. De plus, un autre convoyeur à vis est utilisé pour le transport du compost, du réacteur à l'entrepôt à fumier. Le coût de l'ensemble de ces équipements pour un réacteur représente un total de 18 350 $. Le coût du système électrique et d'installation dans l'annexe à compost est de 23 300 $. Le coût d'un réacteur à compost s'élève donc à 70 450 $.

L'ajout d'un deuxième réacteur à compost fait monter le coût total à 103 090 $. En incluant le coût de l'essoreuse et de l'annexe, un investissement total de 143 090 $ a été nécessaire pour l'implantation d'un système de compostage à deux réacteurs à la ferme Berthely.

Un système de compostage novateur à un réacteur serait réalisable à moindre coût. La réduction du temps de séjour du compost dans le réacteur et la construction d'un seul réacteur (70 450 $) à compost permettraient de diminuer le coût du système. La mise en place de l'annexe à compost, de dimension plus petite et qui serait localisée dans l'entrepôt à fumier, est estimée à 15 000 $. Un déboursé de 100 450 $ serait alors nécessaire pour l'implantation de ce système à la ferme, en considérant un coût d'achat de l'essoreuse de 15 000 $ .

Selon nos estimés, le prix d'une essoreuse adaptée aux conditions d'utilisation de la ferme serait de 40 000 $. En plus, le coût d'un réacteur à compost simplifié et fonctionnel serait d'au moins 55 000 $.

Le tableau 6.10 présente le résumé des coûts d'un système de compostage en réacteur.

## TABLEAU 6.10 : COÛTS DU SYSTÈME DE COMPOSTAGE EN RÉACTEUR

| Équipements installés à la ferme Berthely | | Coûts ($) | |
|---|---|---|---|
| | | 1 Réacteur | 2 Réacteurs |
| Annexe à compostage | minimum | 15 000 à | 15 000 à |
| | réelle | 25 000 $ | 25 000 $ |
| Essoreuse à fumier | | 15 000 $ | 15 000 $ |
| Réacteurs à compost | | 28 800 $ | 57 600 $ |
| Système de vidange et d'alimentation | | 18 350 $ | 20 490 $ |
| Système électrique | | 23 300 $ | 25 000 $ |
| **Réacteur à compost complet** | | **70 450 $** | **103 090 $** |
| **TOTAL RÉACTEUR** | minimum | **100 450 $** à | 133 090 $ à |
| | réelle | 110 450 $ | **143 090 $** |

## 6.6 DISCUSSION

Les résultats obtenus suite aux essais de compostage en réacteur se résument de la façon suivante :

### 6.6.1 LITIÈRE

- Le hachage de la paille facilite l'homogénéisation du fumier dans la trémie et facilite la circulation du fumier de la trémie à l'essoreuse; le hachage de la paille a été rendu nécessaire pour le bon fonctionnement des opérations d'essorage. Il a permis de réduire les risques de bris mécaniques du système d'alimentation de la trémie.

- Le hachage de la paille à l'étable exige cependant des coûts et de la main-d'oeuvre supplémentaires; à la ferme Berthely, cette opération exigeait un temps supplémentaire de 3 à 5 minutes comparativement au temps habituel consacré à l'épandage de la paille non hachée.

### 6.6.2 ESSORAGE

- L'essoreuse à fumier utilisée n'est pas adaptée au contexte de la ferme laitière et son niveau de fiabilité a entraîné les problèmes suivants :

  - alimentation de l'essoreuse difficilement compatible avec le fumier solide;
  - fraction importante des solides retrouvée dans la fraction liquide essorée: la siccité de la fraction liquide est d'environ 8 %. Pour que l'essorage du fumier soit intéressant à considérer comme mode de gestion des fumiers, la fraction liquide doit être exempte de solides.

- L'essorage et le compostage des fumiers ne permettent pas d'obtenir une gestion des fumiers à la ferme exclusivement sous forme solide. À ce sujet, nous observons les points suivants :

  - l'essorage du fumier occasionne une augmentation importante du volume de liquide à entreposer et à disposer;
  - le volume de liquide produit par l'essorage du fumier est plus important que le volume de fumier essoré avec l'équipement d'essorage mis à l'essai;

- l'essorage du fumier et le compostage de la fraction solide essorée ne permettent pas de réintroduire le liquide d'essorage dans le fumier composté sans produire de liquides puisque la TEE du compost ne s'est pas suffisamment abaissée lors du compostage en réacteur.

- L'essorage produit un fumier essoré appauvri en potassium et enrichi en matière sèche et en matière organique.

- La proportion massique d'azote et de phosphore qui se retrouve dans le fumier essoré (43 %) est équivalente à la proportion massique totale du fumier essoré (42 %). L'idéal serait de retrouver 100 % de la proportion massique de ces éléments dans le fumier essoré.

- L'essorage du fumier à l'aide d'équipements plus performants pourrait permettre d'augmenter les proportions d'éléments pouvant se retrouver dans le fumier essoré et de diminuer le volume de liquide d'essorage à gérer.

- Le C/N et la porosité du fumier essoré sont supérieurs à ceux du fumier frais et de ce fait, plus conformes aux paramètres optimaux de compostage.

### 6.6.3 COMPOSTAGE

- Le compostage de l'ensemble de la masse du compost en réacteur s'est bien déroulé; des différences marquées sont notées entre le fumier frais, le fumier essoré et le fumier composté pour notamment la couleur, l'odeur et la friabilité des matériaux.

- L'élévation de la température de l'ensemble de la masse de compost témoigne du bon déroulement des processus de compostage; le système implanté à la ferme permet un contrôle adéquat des paramètres du compostage.

- Une réduction d'environ 25 % du volume et de la masse de compost est obtenue après 30 jours de compostage en réacteur.

- Des quantités importantes d'eau sont évaporées mais à cause de la réduction de la masse de matière sèche, la teneur en eau du compost n'a pas diminué pour un temps de compostage en réacteur de 21 jours; pour cette raison, il apparaît improbable de pouvoir introduire les liquides d'essorage dans le compost sans

produire de lixiviats provenant du compost réhumecté. La gestion des fumiers par essorage/compostage sous une forme exclusivement solide n'apparaît pas possible.

- Le réacteur à compost implanté à la ferme ne permet pas d'atteindre les objectifs déterminés en début de projet. L'opération du système est complexe pour le producteur, les mécanismes d'essorage et de vidange doivent être améliorés et le coût du procédé de compostage en réacteur apparaît trop élevé pour les bénéfices obtenus.

- Le système de vidange du réacteur à l'aide de fourches n'est pas adapté aux caractéristiques du fumier essoré. Il aurait été intéressant de modifier l'humidité du fumier à la hausse et à la baisse pour connaître les limites acceptables pour assurer le bon fonctionnement du système de vidange. Cependant, l'intensité du phénomène d'agglomération en mottes solides du compost en cours de compostage remet en cause le principe du système de vidange.

- Les modifications des caractéristiques du fumier composté après 9, 21 et 30 jours ne justifient pas les coûts d'un système de compostage en réacteur. La filière essorage/compostage en tas dans l'entrepôt à fumier permettrait d'atteindre des résultats similaires à la filière essorage/compostage en réacteur à un moindre coût.

- L'acquisition de système de récupération de la chaleur dégagée par le compost sous forme de vapeur humide n'apparaît pas être techniquement et économiquement intéressante. Le coût d'acquisition de tels systèmes est élevé compte tenu des conditions d'utilisations (milieu chaud, humide et corrosif).

- L'essorage et le compostage de la fraction essorée directement en tas permettraient à toute fin pratique de respecter les critères de conception fixés au début du projet soit : système simple, fiable et économique. Ce type de gestion permettrait le déroulement des processus de compostage d'une façon moins optimale tout en réduisant de façon importante le coût des équipements et la complexité du compostage en réacteur. Par contre, plus on tente de simplifier le procédé de compostage, plus on s'approche de la technique d'entreposage en tas du fumier.

### 6.6.4 CRITÈRES DE CONCEPTION VS RÉSULTATS OBTENUS

En début de projet des contraintes de conception avaient été relevées pour permettre l'implantation à la ferme d'un système de compostage en continu fonctionnel et économiquement intéressant. Ces contraintes sont ici reprises et commentées en fonction des résultats obtenus.

Contrainte n° 1 : L'unité de compostage mise à l'essai sera attenante au système d'évacuation et d'entreposage déjà en place. Le système de gestion des fumiers sera opérationnel avec ou sans unité de compostage. Le procédé devra s'adapter à la fois au système avec montée d'écureur et au système avec évacuateur souterrain. Le procédé n'exigera pas de développement majeur; il utilisera des technologies existantes.

**Résultats n° 1** : Malgré l'espace restreint dans l'annexe, le système a été installé sous la montée d'écureur et il est opérationnel avec ou sans système de compostage. Le système d'alimentation de l'essoreuse n'est pas pleinement opérationnel; il reste encore du développement à faire pour rendre cet équipement parfaitement adapté et mécaniquement durable. Le système de vidange du réacteur demanderait des modifications majeures pour permettre l'évacuation facile du compost.

Contrainte n° 2 : Le procédé de compostage sera opérationnel 365 jours par année et le procédé sera contrôlé et automatisé; il n'exigera pas de main-d'oeuvre supplémentaire, comparativement à une gestion conventionnelle des fumiers et il permettra la production d'un compost de qualité constante et uniforme. L'espace disponible dans l'annexe devra être utilisé au maximum.

**Résultats n° 2** : Le système a fonctionné l'hiver sans problème mais il a fallu que l'annexe soit isolée et que tous les mécanismes (tuyaux, pompe, essoreuse à fumier) soient à l'abri du gel. Le système implanté à la ferme n'exige pas de main-d'oeuvre supplémentaire mais demande une surveillance constante de la mécanique compte tenu de la complexité opérationnelle du système. L'espace dans l'annexe a été utilisé au maximum mais la nécessité d'utiliser deux réacteurs est remise en question.

Contrainte n° 3 : Le procédé sera opérationnel pour un fumier contenant des quantités de litière variables et le fumier introduit dans le réacteur aura une teneur en eau b.h. comprise entre 70 et 75 % et permettra la production d'un compost de qualité constante et uniforme.

**Résultats n° 3** : L'essorage fonctionnerait mieux avec des matériaux plus fins et moins fibreux. La quantité de litière appliquée à la ferme Berthely permettait un fonctionnement adéquat. Le fumier essoré a des caractéristiques structurelles intéressantes pour le compostage ainsi qu'une humidité adéquate. L'essorage du fumier permet d'accroître l'uniformité du compost.

En cours d'essais, il a été suggéré d'humidifier le fumier dans la trémie d'alimentation pour le rendre plus fluide et éviter les bris mécaniques lors du transfert du fumier de la trémie d'alimentation à l'essoreuse. Mécaniquement, cette façon de faire était intéressante à envisager. Par contre, elle aurait augmenté le temps d'essorage et diminué les performances de l'essoreuse.

Contrainte n° 4 : Le coût de l'unité de compostage devra être inférieur à 25 000 $ (incluant l'entrepôt à compost) pour une ferme type (de 31 vaches laitières).

**Résultats n° 4** : Il s'est avéré impossible de rencontrer cette contrainte. Le coût de l'essoreuse excède à elle seule 25 000 $. De plus, le coût d'un seul réacteur simplifié est évalué à environ 55 000 $. L'achat à la ferme de cet équipement, pourrait être envisageable seulement pour les entreprises laitières d'une envergure supérieure à la moyenne ou celles qui veulent produire du compost sur une base commerciale.

Contrainte n° 5 : La durée du compostage en réacteur devra permettre une réduction du volume de fumier d'au moins 30 %.

**Résultats n° 5** : En 30 jours de compostage il y a eu une réduction de 25 % du volume de fumier essoré. Par contre, globalement, la réduction de l'espace d'entreposage (du fumier : fraction liquide et fraction solide) est faible ($\approx$ 10 %) à cause de l'augmentation du volume de liquide essoré à entreposer.

Contrainte n° 6 : Le système pourrait récupérer et traiter les gaz à la sortie du réacteur; il permettrait aussi de récupérer l'énergie thermique dégagée lors du compostage.

**Résultats n° 6** : Le système peut récupérer les gaz à la sortie du réacteur, mais la récupération de l'énergie thermique n'apparaît pas être techniquement et économiquement intéressante.

Contrainte n° 7 : Le système d'entreposage du compost sera couvert d'une toiture et sera peu complexe.

**Résultat n° 7** : L'entrepôt à fumier existant de la ferme Berthely répond parfaitement à cette contrainte.

## 6.7 CONCLUSION

Le compostage des fumiers de bovins laitiers en réacteur en continu 365 jours par année est techniquement réalisable à la ferme. Le système de compostage implanté à la ferme s'insère bien dans la chaîne de gestion des fumiers entre l'étable et l'entrepôt à fumier. La mise en place d'un procédé de compostage en réacteur ajoute cependant une étape supplémentaire à la gestion conventionnelle du fumier (évacuation, entreposage, épandage). Les gains environnementaux et agronomiques du compostage en réacteur doivent cependant justifier les coûts supplémentaires.

Après 30 jours de compostage en réacteur, le volume et la masse de matériel sont réduits de 25 %. L'entreposage directement sur le sol du fumier composté après 21 jours de compostage en réacteur serait environnementalement possible si le compost était à l'abri des précipitations.

L'implantation à la ferme d'un réacteur à compost complètement automatisé et fiable entraîne des contraintes techniques complexes. Pour fonctionner sans surveillance, le système d'essorage, le système d'alimentation et de vidange du réacteur doivent être améliorés et simplifiés. Par ailleurs, le système en continu de compostage en réacteur développé n'apparaît pas être économiquement intéressant en fonction des gains environnementaux et agronomiques qu'il procure.

Le coût minimum d'un réacteur à compost est estimé à 55 000 $. À ce montant doivent être ajoutés les coûts de l'essoreuse et les convoyeurs pour la manipulation du matériel. Même la possibilité de récupérer une fraction de l'énergie et de l'azote dégagés en cours de compostage ne saurait justifier les investissements requis.

La décision d'implanter un tel système à la ferme doit se justifier par d'autres motifs tels que : contraintes liées à la production d'aliments à la ferme en mode biologique, destruction des mauvaises herbes, qualité de la matière organique, flexibilité d'utilisation des fumiers compostés, production à la ferme de compost de qualité commerciale, etc.

La gestion des fumiers par essorage et compostage en tas couvert de la fraction de fumier essorée apparaît être une avenue plus intéressante à investiguer. L'essorage du fumier frais permettrait d'améliorer certains paramètres de compostage tels que la TEE, la porosité et le rapport C/N.

L'essoreuse implantée à la ferme devra avoir un système d'alimentation fiable permettant un fonctionnement sans surveillance. Le liquide d'essorage extrait du fumier devra avoir une siccité inférieure à 8 % pour permettre une gestion plus efficace des solides (compost) et des liquides. Le coût d'une essoreuse à fumier fiable, performante et adaptée aux conditions de la ferme est estimé à 40 000 $.

En essorant le fumier de la fraction liquide, le volume de liquide à gérer est important. Cette fraction de liquide d'essorage représente environ 60 % du volume de fumier frais produit sur la ferme. La capacité d'entreposage de la fraction liquide du fumier à la ferme devra être doublée par rapport aux critères actuels pour la gestion du fumier de bovins laitiers.

Avant de poursuivre les travaux de compostage en réacteur du fumier de bovins laitiers, certaines avenues de recherche importantes mériteraient d'être investiguées. Nous recommandons dans un premier temps, la réalisation d'une étude technico-économique sur l'essorage mécanique du fumier de bovins laitiers. Dans la positive, il serait intéressant de procéder au développement d'une essoreuse à fumier et d'initier un projet de démonstration à la ferme de la gestion du fumier de bovins laitiers par essorage du fumier et compostage en tas couvert de la fraction essorée.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASAE STANDARDS (1989), D384.1. Manure production and characteristics. 659 p.

BIOREX (1989). Le compostage du fumier à la ferme. Étude de faisabilité technico-économique et évaluation des impacts agronomiques et environnementaux : rapport final. Québec : Ministère de l'Environnement, 275 p.

Besson, J.M., Vogtmann, H. (1982). European Composting Methods : Treatment and Use of Farm Yard Manure and Slurry in Composting Theory and Practice for City. Industry and Farm. p. 248 à 258

CPVQ et Service du génie MAPAQ (1992). Structure d'entreposage des fumiers. lisiers et purins : manuel d'ingénierie. AGDEX-710. 135 p.

Jeris, J.S., Regan, R.W. (1973). Controlling Environmental Parameters for Optimum Composting : part I Experimental Procedures and Temperature, Compost Science. 23 p.

Hellickson, M.A. & Walker J.N. (1983). Ventilation of agricultural structures by the American Society of Agricultural Engineers (ASAE). 372 p.

Hummel, J.W., Willson, G.B. (1975). High Rate Mechanized Composting of Dairy Manure, Managing Livestock Wastes. p. 481-484

L'Heureux, M.B. (1993). Le compostage des fumiers de bovins laitiers sous aération forcée, 2e congrès annuel du Conseil canadien du compostage. Institut de technologie agro-alimentaire. p. 255 à 274

Mustin, M. (1987). Le compost, gestion de la matière organique. Éditions François Dubusc. Paris. 954 p.

Ott, P.R. (1990). The Composting of Farmyard Manure with Mineral Additives and Under Forced Aeration and the Utilization of Fym and Fym Compost in Crop Production. Thèse de doctorat : Université des Landes Hessen. 275 p.

# CHAPITRE 7 : RÉSUMÉ ET DISCUSSION GÉNÉRALE

CRIQ
CENTRE DE RECHERCHE
INDUSTRIELLE DU QUÉBEC

## 7.1 INTRODUCTION

Les nombreuses investigations menées dans le cadre de ce projet se regroupent dans trois grandes avenues de recherche soit :

- l'acquisition de données de base sur l'emploi des litières;
- la démonstration de diverses alternatives pour le compostage du fumier de bovins et l'évaluation de leurs impacts sur le déroulement des processus de compostage et sur la production de lixiviats.
- Le développement d'un procédé de compostage novateur adapté à l'échelle de la ferme laitière.

L'ensemble des travaux réalisés dans ces trois avenues de recherche a généré de multiples résultats qui concernent les diverses étapes de la chaîne de gestion des fumiers. Ces données doivent être regroupées et traitées en tenant compte du contexte d'opération de la ferme laitière afin de dégager les actions ou les techniques les plus respectueuses pour l'environnement et ce, à chaque étape de la chaîne de gestion du fumier par compostage.

## 7.2 OBJECTIFS

Compte tenu de la diversité des travaux initiés, le présent chapitre vise à intégrer l'ensemble des résultats qui ont été présentés dans les chapitres précédents. Sur la base de ces informations, le texte qui suit se veut une réflexion générale portant sur les principales options potentielles visant à optimiser les techniques de compostage à la ferme. La discussion porte notamment sur l'impact environnemental des alternatives étudiées. On y retrouve également certaines recommandations sur les avenues, scénarios et travaux qui nous apparaissent intéressants à considérer dans un avenir immédiat. Ce chapitre vise donc à déterminer les actions les plus intéressantes à poser pour optimiser le compostage des fumiers de bovins laitiers et à diminuer au maximum l'impact à l'environnement de cette pratique.

## 7.3 INTÉRETS DE LA GESTION PAR COMPOSTAGE

Le compostage du fumier de bovins laitiers, tel qu'il se pratique actuellement sur les fermes, représente une étape supplémentaire à la chaîne de gestion conventionnelle du fumier. Les intérêts agronomiques, environnementaux et économiques qui justifient le choix de cette pratique, reposent sur un ensemble de considérations qui touchent à la fois le procédé de compostage (comme mode de gestion) et le produit qui en découle (comme amendement pour les sols). Les principaux avantages véhiculés dans le milieu agricole qui découlent des opérations de compostage du fumier à la ferme sont discutés sur la base des travaux réalisés dans le cadre de ce projet.

### 7.3.1 AVANTAGES

**1) Élimination des structures d'entreposage du fumier ou réduction des coûts de la structure d'entreposage;**

*Le compostage en andains ne permet pas d'éliminer le besoin d'entreposer adéquatement le fumier au cours de la période hivernale. Pour le compostage en continu (réacteur), la nécessité d'entreposer le fumier composté avant son utilisation au champ demeure. La réduction du volume de fumier obtenue suite au compostage en réacteur pendant 30 jours a été de 23 %. L'optique de réduire la quantité de fumier à entreposer suite au compostage est justifiable mais elle ne contourne pas la nécessité de gérer adéquatement la fraction liquide et solide du fumier. L'essorage de 1 m³ de fumier humide (TEE b.h. = 84 %) jusqu'à une TEE de 75 % s'est traduite par la production de 0,6 m³ de liquides d'essorage et de 1,4 m³ de fumier essoré non-compacté. La teneur en eau du compost ainsi obtenu, ne permet pas de croire qu'il aurait été possible de recirculer dans le compost ces liquides sans générer de lixiviats.*

**2) Gestion du fumier sous forme entièrement solide et élimination ou réduction de la gestion de la fraction liquide du fumier;**

*Pour des quantités de paille variant de 2 à 6 kg/u.a.-j, la production de lixiviats n'a pas été entièrement éliminée à l'une ou l'autre des étapes de la gestion des fumiers incluant l'étape de compostage en andains. La gestion solide du fumier par compostage sans production de lixiviats par l'utilisation exclusive d'absorbants nécessiterait des quantités de litière considérables. Basée sur le pouvoir absorbant des pailles, la quantité théorique requise pour qu'il n'y ait pas de risques de rejets de*

*liquides dans l'environnement à l'une ou l'autre des étapes de la chaîne de gestion des fumiers est d'environ 15 kg de paille /u.a.-j.. La mise en place de pratiques telles que l'emploi de toiles de recouvrement et de lits absorbants à la base de l'andain ont permis de réduire la quantité de lixiviats produits. Compte tenu de la TEE initiale élevée du fumier de bovins laitiers, la réintroduction de purin au matériel en compostage n'est pas une avenue qui permet de réduire de façon importante la quantité de liquides à gérer.*

**3) Réduction de la teneur en eau du fumier lors du compostage;**

*Les essais de compostage en réacteur ou en andain couvert ont démontré que la teneur en eau du compost diminuait faiblement en cours de compostage. Bien que les quantités d'eau évaporées en cours de compostage soient importantes, la TEE du compost reste relativement constante en raison de la perte importante de masse sèche résultant de la biooxydation des matières organiques.*

**4) Réduction de la masse et du volume de fumier à gérer;**

*Le volume de fumier à épandre a été réduit de 44 à 57 % suite au compostage en andains avec retournements sur une période de 140 jours. La réduction de la masse de fumier lors de ces essais était comprise entre 49 et 67 %.*

*Dans le cas des essais de compostage en réacteur de la fraction solide du fumier essoré, la technique utilisée a permis de réduire la masse de celui-ci de 26 % et le volume de 23 % pour un temps de compostage de 30 jours. Les opérations combinées d'essorage et de compostage de la fraction solide ont occasionné une réduction globale de la masse de fumier à gérer (liquide d'essorage + fumier composté) d'environ 10 %.*

**5) Concentration de la valeur fertilisante du fumier;**

*La quantité totale d'éléments fertilisants contenue dans le fumier est maximale à l'étable. La gestion du fumier par compostage conduit, à l'instar des autres modes de gestion, à des pertes en N, P et K inévitables qui seront importantes dans le cas de pratiques inadéquates. En général, les pertes en phosphore sont faibles et il y a augmentation de la concentration de cet élément dans le compost comparativement au fumier. Pour le potassium, il y a augmentation de la concentration si le lessivage du fumier et du compost est évité ou restreint. Par exemple, le compostage fait sous abri et en réacteurs a généré des composts dont les concentrations en K étaient plus élevées que celles mesurées dans les fumiers frais correspondants.*

*Les pertes en azote sont inévitables lors du compostage; les caractéristiques du fumier de bovins laitiers frais ou entreposé et les opérations de compostage sont favorables aux pertes d'azote. Malgré les pertes encourues, on a observé une augmentation de la valeur fertilisante du compost (N, P et K)par rapport au fumier de plus du double pour un fumier composté sous couvert (10 $ N-P-K/t.m. de fumier comparativement à 22 $ N-P-K/t.m. de fumier composté).*

**6) Stabilisation de la matière organique permettant une période d'utilisation accrue et une plus grande diversité d'application;**

*Si le compostage est un procédé visant à stabiliser les matières organiques fraîches, le niveau de stabilité du fumier recherché dans le contexte pratique de la ferme laitière reste encore à déterminer en fonction du type de cultures et des effets bénéfiques recherchés.*

*Les essais de respirométrie ont permis de déterminer la stabilité de la matière organique des fumiers et des composts. Les fumiers compostés au cours d'une saison de compostage ont une consommation en oxygène généralement inférieure à 700 mg $O_2$/(kg de solide volatil - h) comparativement aux fumiers frais ou entreposés dont la consommation en oxygène est généralement supérieure à 2 600 mg $O_2$/(kg de solide volatil - h). Les fumiers compostés vendus sur le marché québécois ont une consommation en oxygène inférieure à 100 (CRIQ, 1993).*

**7) Hygiénisation du fumier; destruction des pathogènes et des graines de mauvaises herbes;**

*Lors des essais de compostage en pile sur la plate-forme expérimentale du CRIQ, aucune croissance de végétaux n'a été observée à la surface des composts retournés au cours du compostage;*

*la présence de mauvaises herbes à la surface du compost a été observée pour le fumier composté sans retournement.*

**8) Élimination des odeurs du fumier afin de permettre une utilisation facile du compost et une réduction des nuisances;**

*Les fumiers compostés n'ont plus les odeurs caractéristiques du fumier frais ou celles du fumier entreposé en conditions d'anaérobiose. Ils sont habituellement plus friables et leur manipulation est plus agréable que celle du fumier frais. Suite aux retournements, leur homogénéité s'accroît.*

**9) Réduction des apports en engrais de synthèse découlant de l'application de composts;**

**10) Adoption d'un mode de pratiques culturales requis en agriculture biologique;**

Les essais du CRIQ ne portaient pas sur ces deux derniers avantages.

Les arguments 1 à 5 reposent sur des considérations d'ordres économiques. Les arguments 6 à 10 sont difficilement quantifiables bien qu'ils représentent pour plusieurs agriculteurs, des points d'intérêts majeurs dans leur cadre de production à la ferme. Ces derniers arguments n'ont pas fait l'objet d'investigations au cours de ce projet de recherche.

Comme il a été mentionné précédemment, il appert que le compostage du fumier de bovins laitiers à la ferme comporte également des inconvénients pour celui qui le pratique. Les aspects négatifs les plus souvent discutés sont : les pertes en N-P-K du fumier, la production et la gestion des lixiviats et le temps supplémentaire requis par ce mode de gestion.

Les sections qui suivent traitent notamment de ces aspects limitatifs ainsi que des solutions ou alternatives envisageables visant à améliorer la performance environnementale et agronomique du compostage dans le contexte pratique de la ferme.

## 7.3.2 CONTRAINTES DU COMPOSTAGE

### 7.3.2.1 Caractéristiques des fumiers et gestion par compostage

Les caractéristiques du fumier de bovins laitiers sont variables d'une ferme à l'autre. Plusieurs facteurs expliquent la variabilité des caractéristiques initiales des fumiers : caractéristiques du troupeau, quantité et nature de la litière utilisée, mode et temps d'entreposage du fumier, intensité des précipitations lors de l'entreposage et localisation de l'échantillon dans le tas de fumier.

À des quantités de litière variant de 2 à 6,4 kg/u.a.-j, les fumiers analysés sont tous très humides (TEE comprise entre 74 et 83 %) et leur C/N sont bas (entre 12 et 20). Les valeurs obtenues pour les autres paramètres de compostage (porosité et structure pour l'aération du compost) n'apparaissent pas limitatives pour le déroulement des processus de compostage du fumier.

En raison de la TEE élevée et du C/N bas des fumiers de bovins laitiers, la production de lixiviats et les pertes d'azote par volatilisation apparaissent inévitables lors du compostage. D'un point de vue environnemental, agronomique et économique, la production et la gestion des liquides constituent une interrogation majeure pour le développement du compostage du fumier sur les fermes laitières. Selon Rynk (1994), le problème le plus fréquemment rencontré par les agriculteurs lors du compostage des fumiers de bovins, est la quantité trop importante d'eau dans le matériel et sur le site de compostage.

Pour l'ensemble des fumiers compostés au cours de l'étude, les pertes de masse se situent entre 42 et 67 % et les pertes de volume entre 27 et 57 % et ce, après 140 jours de compostage en pile sur plate-forme de béton; les plus faibles réductions de masse et de volume ont été obtenues avec le compost non retourné. Pour les composts non couverts, les pertes au compostage en azote, phosphore et potassium total, représenteraient un déboursé annuel compris entre 3,96 et 7,19 $/t.m. de fumier à la reprise; environ 90 % de la valeur monétaire de ces pertes est attribuable aux pertes en azote et en potassium. Pour la ferme type, les pertes en N-P-K représentent une valeur monétaire comprise entre 1 877 et 3 408 $. Ce calcul est basé sur le prix de l'unité fertilisante des trois éléments majeurs déterminée à partir du coût des engrais simples minéraux.

Certains correctifs apportés à la composition du fumier jumelés à de bonnes pratiques de gestion par compostage pourraient diminuer l'ampleur des problèmes découlant des caractéristiques initiales du fumier. On pense notamment à l'ajout d'absorbants ou à l'essorage du fumier pour diminuer la TEE et augmenter le rapport C/N du fumier. L'utilisation de toiles de recouvrement ou d'absorbants à la base de l'andain constituent des pratiques qui minimisent la production de lixiviats lors du compostage. Tous ces aspects correctifs sont abordés dans les sections qui suivent.

La majorité des fumiers compostés qui ont fait l'objet d'un suivi relativement à la production de lixiviats ont généré des liquides en quantités et en caractéristiques variables.

#### 7.3.2.2 Production de lixiviats

Durant les essais sur plates-formes de béton au CRIQ, nous avons mesurés le volume et les caractéristiques du lixiviats qui s'écoule et ce pour divers traitements. Des essais sur des fermes nous ont également permis de caractériser l'écoulement des lixiviats sous les andains au champs.

##### 7.3.2.2.1 Volumes

Les taux d'émissions surfaciques de lixiviat qui s'écoule des andains de compost que nous avons mesurés sur les plates-formes de béton à l'extérieur se situe entre 1,1 et 2,5 L/m$^2$-j. Des taux d'émissions de lixiviats en litres par tonnes de fumier ont aussi été mesurés. Pour les composts retournés à l'extérieur, nous avons mesurés des valeurs comprises entre 282 et 578 L/t.m. de fumier (cf chap. 4). Pour la ferme type (474 t.m. de fumier à la reprise, BIOREX 1989) cela correspond à environ 200 m$^3$ de lixiviat. Pour le compost couvert C1 environ 30 m$^3$ de lixiviat s'écoulerait sur la ferme type. L'impact réel de ces lixiviats à l'échelle du bassin versant n'a pas été mesuré ou calculé. Cependant ils représentent quand même une perte d'éléments fertilants vers la nappe phréatique.

##### 7.3.2.2.2 Caractéristiques des lixiviats

Le tableau 7.1 résume les caractéristiques des lixiviats obtenus lors du compostage des fumiers de bovins. L'analyse de ce tableau indique que les lixiviats prélevés sous l'andain en début de compostage sont plus chargés que ceux générés par la suite.

Après un hiver, les lixiviats écoulés des composts sont moins chargés que ceux de la première année. Les liquides issus de l'essorage mécanique du fumier sont toujours les plus concentrés. Les concentrations en N, P, K et en masse sèche des lixiviats de diverses origines décroissent selon l'ordre suivant : liquides d'essorage mécanique du fumier, lixiviats produits en début de compostage, lixiviats produits en cours de compostage et lixiviats issus du compost après un hiver.

Le calcul de la charge cumulative en éléments fertilisants retrouvés dans le lixiviat en cours de compostage, indique aussi que l'impact environnemental des lixiviats est plus important en début de compostage qu'à la fin en raison de la perte progressive des éléments. Ce constat n'est valable que pour les composts non couverts soumis aux précipitations habituelles. Un compost fabriqué et conservé à l'abri des précipitations avant la maturité pourrait, lorsque soumis aux précipitations, produire des lixiviats chargés à la fin du compostage.

## TABLEAU 7.1 : CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS

| Caractéristique | lixiviat plate-forme de compostage | | | liquide d'essorage | lixiviat ferme | | BIOREX (1994) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Début: mise en tas | | en cours de compostage | | 1 ère saison | 2 ième saison | Purin | lixiviat |
| | C1,C3,C4,C6 | C5 | | | | | ferme B | compost |
| pH | 7,4 | 8,0 | [8-9,7]: 8,7 | 7,5 | [6,4-8,2]: 7,5 | [7-8]: 7,6 | | |
| CE (mS/cm) | 25,2 | 9,8 | [6,2-28,2]: 16,0 | 25,0 | [2,6-27,7]: 11,4 | [1,6-16,2]: 8,0 | | |
| DCO (mg $O_2$/L) | 69 074 | 15 939 | [6 353-47 619]: 20 755 | | [1 945-30 000]: 15 462 | [n.d.-2 738]: 399 | | |
| $DBO_5$ (mg $O_2$/L) | 31 964 | 8 648 | [94-16 854]: 3 023 | | [125-20 350]: 8 168 | [n.d.-10 988]: 4 239 | | |
| MES (mg/L) | 18 770 | 1 200 | [100-3 500]: 800 | | [80-1 600]: 515 | [n.d.-3 200]: 446 | | |
| Ktot (mg/kg) | 5 905 | 1 725 | [1 862-7 914]: 4 855 | 7 081 | [22-5 788]: 2 282 | [n.d.-4 487]: 1 378 | 2 103 | 2 310-5 029 |
| Ptot (mg/kg) | 613 | 78 | [49,4-207,0]: 103,2 | 1 169 | [2-143]: 49 | [n.d.-41,1]: 15,2 | 104,8 | 111,4-137,9 |
| Ntot (mg/kg) | 4 123 | 1 100 | [280-3 600]: 1 370 | 5 267 | [40-6 000]: 1 234 | [180-3 870]: 756 | 873,7 | 709,2-935,5 |
| TEE b.h. (%) | 94,4 | 98,7 | [95,2-99,1]: 97,5 | 92,5 | [95,9-99,7]: 98,4 | [98,2-99,6]: 99,1 | | |
| $NH_4$ (mg/kg) | 2 603 | 730 | [12-2 290]: 680 | 2 917 | [n.d.-2 740]: 738 | [20-670]: 264 | | |

Rem.: les résultats de Ktot, Ptot, Ntot et $NH_4$ sont en mg par kg de lixiviat, donc sur une base humide

## 7.4 TECHNIQUES ÉTUDIÉES POUR RÉDUIRE LA PRODUCTION DE LIXIVIATS ET LES PERTES EN COURS DE COMPOSTAGE

### 7.4.1 UTILISATION DES LITIÈRES

Le choix des matériaux utilisés comme litière à la ferme repose sur un ensemble de considérations : disponibilité, coût d'acquisition, facilité d'utilisation, volume d'entreposage et propriété absorbante. Pour l'ensemble des absorbants utilisables sur la ferme, la capacité d'absorption des liquides varie grandement en fonction de la nature même du matériel. Dans le contexte d'utilisation des litières à la ferme, trois points importants doivent être considérés : la teneur en eau initiale de l'absorbant, le temps et la qualité du contact liquide/litière et l'aptitude des absorbants à relâcher l'eau lorsqu'ils sont soumis à des pressions lors de l'entreposage et du compostage des fumiers.

D'un point de vue environnemental, la gestion des fumiers de bovins laitiers par compostage sans production de liquides à l'une ou l'autre des étapes de gestion (évacuation, entreposage, compostage, épandage), nécessite une dose de paille importante au dalot, peu importe la quantité de paille appliquée, cet objectif n'est pas atteignable. Les critères actuels de 4 et 6 kg de litière/u.a.-j utilisés uniquement à l'étable n'apparaissent pas suffisants pour assurer l'absence de production de lixiviats à l'entreposage et au compostage du fumier et ce, même si les fumiers sont couverts lors de ces deux étapes.

Le déroulement des processus de compostage apparaît être satisfaisant lorsque la TEE du fumier au début des essais est inférieure à 80 % et que la porosité effective du fumier est supérieure à 60 %. L'atteinte simultanée de ces valeurs est possible pour des quantités de paille supérieure à 2 kg/u.a.-j. En pratique, il est cependant difficile de produire un fumier dont la porosité est supérieure à 60 % avec l'utilisation de 2 kg/u.a.-j de paille. Un tel fumier devrait avoir une TEE b.h. inférieure à 73 %. L'utilisation de 4 kg/u.a.-j de paille ne permet pas d'atteindre automatiquement le critère de porosité. A cette dose d'utilisation de paille, la TEE du fumier doit être inférieure à 80 %. Dans le contexte actuel de gestion du fumier de bovin laitier, l'utilisation de 6 kg/u.a.-j permet de respecter les exigences de porosité et d'humidité requises. Les risques de production de lixiviats à l'entreposage et au compostage ne sont pas éliminés même à ces quantités de paille. L'utilisation massive de paille se heurte à des problèmes pratiques, mécaniques et économiques. Les doses maximales de paille autorisées par les systèmes

d'évacuation du fumier rencontrées sur les fermes laitières sont inférieures à 6 kg/u.a.-j et cette quantité de paille à l'étable est déjà considérée comme contraignante par les producteurs agricoles. Si la montée d'écureur ne permet pas l'évacuation de doses importantes de paille, le producteur devra songer à fractionner l'apport de litière à l'étable, ce qui se traduira par l'augmentation du nombre d'écurages.

Pour des conditions optimales en laboratoire, une quantité théorique moyenne de paille de 3,4 kg/u.a.-j serait requise pour l'absorption complète des urines produites. À la ferme cependant, l'augmentation des quantités de paille au dalot jusqu'à des doses massives de 6 kg/u.a.-j n'a pas permis de réduire la quantité de liquides récoltés avant l'évacuation du fumier; seule une fraction des liquides du dalot est absorbée. Le temps et le contact liquide/litière ne permettent pas de capitaliser sur le plein pouvoir absorbant de la paille.

La quantité de paille requise, pour l'absorption complète de l'urine au dalot et pour satisfaire le critère de la porosité, serait d'au moins 3,5 kg/u.a.-j. Pour augmenter le rapport C/N de la totalité des déjections au niveau optimal de 30, une quantité de paille d'environ 15 kg/u.a.-j serait théoriquement requise.

Pour abaisser la TEE b.h. du fumier à 70 %, une quantité équivalente à 15 kg de paille/u.a.-j est requise. À cette humidité, les risques de production de lixiviats sont pratiquement nuls lors du compostage sous abri.

#### 7.4.1.1 Coût de l'utilisation des litières

Le tableau 7.2 présente les coûts d'utilisation de différentes quantités de paille pour une ferme type de 47 u.a. (BIOREX, 1989). Selon BPR (1994), le coût de la paille est évalué à 90,00 $ / t.m., ce qui correspond à 1,17 $ par balle de 13 kg.

## TABLEAU 7.2 : COÛT D'UTILISATION DE LA PAILLE

| Masse de paille | | Coût de la paille | Masse de fumier |
|---|---|---|---|
| (kg/u.a.-j) | (t.m. / an) [1] | ($ / an) [1] | (t.m. / an) [1] |
| 2,1 | 36 | 3 242 | 877 |
| 3,0 | 51 | 4 632 | 892 |
| 4,0 | 69 | 6 176 | 909 |
| 6,0 | 103 | 9 264 | 944 |
| 12,9 | 221 | 19 917 | 1 062 |
| 15,0 | 257 | 23 159 | 1 098 |

1) utilisation de la paille 365 jours par année.

Le déboursé annuel en paille à la ferme type serait de 3 242 $ pour 47 u.a. et pour une utilisation de 2,1 kg de paille/u.a.-j.. Ce coût ne tient pas compte ni des frais de la main-d'oeuvre supplémentaire pour gérer cette litière et composter le volume de fumier additionnel, ni des infrastructures nécessaires pour entreposer adéquatement cette litière. L'utilisation d'une dose massive de litière (6 kg/u.a.-j), entraîne un coût supplémentaire de paille annuel de 6 022 $. Cette dose de paille occasionne la manipulation d'une masse supplémentaire annuelle de fumier de 67 t.m.. Pour avoir du fumier à l'abri des précipitations dont l'humidité est à 70 %, il faudrait utiliser 15 kg de paille par unité animale par jour ce qui se traduirait par un coût annuel d'achat récurrent de plus de 23 000 $. De plus, il faut, à ces quantités de paille, manipuler plus de 200 tonnes supplémentaires de paille, de fumier et de compost.

### 7.4.2 ESSORAGE

L'essorage du fumier représente une alternative à l'ajout important de paille pour abaisser l'humidité du fumier. Ce processus peut s'effectuer naturellement ou mécaniquement.

#### 7.4.2.1 Essorage naturel

Le drainage naturel du tas de fumier s'observe à la ferme lors de l'entreposage du matériel. Lors du suivi des fermes, la TEE b.h. d'un fumier échantillonné dans la partie supérieure du tas était de 77 % alors qu'à la base, elle était de 80 %.

Le manuel de calcul pour le dimensionnement des structures d'entreposage des liquides générés par l'empilement du fumier sous la montée d'écureur, considère une production d'un volume de liquides équivalent à 25 % du volume de fumier frais (CPVQ, 1992). En plus de l'essorage naturel, la séparation des urines non-absorbées dans le dalot avant l'évacuation peut être réalisée par une grille localisée dans le fond du dalot. Ces deux pratiques diminuent jusqu'à un certain degré la teneur en eau du fumier si celui-ci est couvert lors de l'entreposage.

La technique de réduction de la TEE du fumier par drainage naturel lors de l'empilement ne s'applique que pour une fraction minime de la masse qui est localisée dans le haut du tas. Conséquemment, la technique de l'essorage naturelle obtenue avant le compostage du fumier, ne trouve de l'intérêt que pour une fraction du fumier entreposé et ne constitue pas une alternative complète pour l'ensemble du fumier entreposé.

#### 7.4.2.2 Essorage mécanique

Contrairement à l'essorage naturel, l'essorage mécanique s'applique à l'ensemble du fumier généré à la ferme et se traduit par la production d'un matériel dont la teneur en eau est constante. Plusieurs types d'équipements permettant l'essorage mécanique du fumier sont actuellement disponibles. À notre connaissance, aucun d'entre eux n'est parfaitement adapté ni aux caractéristiques du fumier de bovins laitiers, ni aux modes de gestion solides.

Les essais à la ferme ont démontré que l'essorage du fumier, avec l'équipement à l'essai, fait augmenter le rapport C/N de la fraction solide du fumier essoré, ce qui est favorable au compostage subséquent de cette fraction. D'autre part, l'essorage a diminué les teneurs en eau, en azote, phosphore et potassium du fumier essoré. De plus, la porosité du fumier essoré est supérieure à celle du fumier frais.

Avec l'équipement d'essorage utilisé (essoreuse mécanique à vis), 58 % de la masse totale du fumier, correspondant à 61 % du volume de fumier, se retrouve dans la fraction liquide du fumier essoré. Par rapport aux critères actuels pour la gestion du

fumier de bovins laitiers (CPVQ, 1992), la capacité d'entreposage des liquides à la ferme devrait doubler avec l'utilisation d'une telle essoreuse.

En plus de l'importance de la fraction liquide produite, les caractéristiques de cette dernière obtenues à la ferme, laissent à désirer. Une proportion de 30 % de la masse sèche initialement contenue dans le fumier se retrouve dans le liquide d'essorage; celui-ci a une siccité de 7,5 %. Ces teneurs élevées en masse sèche dans la fraction liquide pourraient créer des problèmes lors de son entreposage (difficulté à pomper le liquide, production de mauvaises odeurs, formation d'un dépôt dans les purots). Suite à l'essorage, on retrouve dans la fraction liquide environ 57 % de la masse d'azote et de phosphore initialement contenu dans le fumier frais ainsi qu'une proportion encore plus importante de potassium, de 67 %. Selon ces résultats, la fraction solide du fumier destinée au compostage est appauvrie en éléments fertilisants au profit de la valeur agronomique de la fraction liquide. Si la gestion d'une fraction liquide et solide ne constitue pas un obstacle pour le producteur, cette avenue pourrait être intéressante dans une optique d'optimisation de l'utilisation des fumiers sur les sols agricoles.

L'essorage mécanique du fumier à la ferme permettrait d'envisager la réduction de la quantité de litière utilisée à l'étable à un taux minimal non déterminé. En regard des objectifs de confort, de propreté et d'hygiène des animaux, on peut croire que la quantité moyenne de 2 kg de litière/u.a.-j de paille (BIOREX, 1989) utilisée actuellement sur les fermes est satisfaisante.

Dans l'hypothèse où le liquide d'essorage serait exempt de solides et que la TEE b.h. du fumier essoré est toujours de 75 %, la masse de la fraction liquide représenterait au minimum 36 % de la masse de fumier frais. La masse de la fraction liquide obtenue des essais a été de 61 % de la masse de fumier initiale, ce qui indique que l'essoreuse utilisée n'est pas très performante. L'utilisation d'un tamis de mailles plus fines et d'une essoreuse plus performante permettrait de limiter la présence de solides dans la fraction liquide mais l'essorage du fumier générera toujours une quantité importante de liquides et ce peu importe le type d'essoreuse.

Il apparaît difficile d'envisager la conception d'un système d'essorage fiable, performant et adapté aux conditions de la ferme laitière et aux caractéristiques du fumier, dont le coût serait inférieur à 40 000 $.

### 7.4.3 COMPOSTAGE COUVERT OU NON COUVERT

Le recouvrement des composts a pour objectif d'éliminer l'apport d'eau sous forme de précipitation et de réduire ainsi la production de lixiviats en cours de compostage. Toutefois, cette technique ne permet pas d'éliminer la production de lixiviats provenant du drainage naturel d'un fumier trop humide observée notamment en début de compostage.

D'un point de vue environnemental et agronomique, le recouvrement des composts est une pratique recommandée dans le contexte du Québec où les précipitations sont importantes. À titre d'exemple, lors des essais comparatifs de compostage sur plate-forme, un compost non couvert a produit 9 fois plus de lixiviats qu'un même compost sous abri. Le recouvrement du compost permet notamment de réduire les pertes en éléments fertilisants par lixiviation. Les pertes totales incluant la volatilisation représentent alors en moyenne 50 % de la valeur monétaire initiale du fumier pour les composts non couverts et 25 % pour les composts couverts.

Le compostage sous abri a permis de réduire de façon importante les pertes en phosphore (inférieures à 5 %) et en potassium (inférieures à 27 %). Les résultats démontrent que pour l'azote, les pertes lors du compostage sous abri s'expliquent davantage par les phénomènes de volatilisation que par le lessivage.

Le compostage sous abri permet de réduire la TEE du compost. À titre d'exemple, lors des essais comparatifs de compostage sur les plate-formes, les teneurs en eau finales des composts couverts et non couverts étaient respectivement de 74,6 % et 82,4 % pour un matériel de départ de TEE identique.

Selon les caractéristiques de perméabilité à l'air et à l'eau du matériel de recouvrement utilisé, le recouvrement de l'andain de compost peut favoriser ou défavoriser les processus de compostage. Comparativement à la toile imperméable, le géotextile a permis de maintenir des températures plus élevées dans le compost, de réduire plus efficacement la TEE du compost et la quantité de lixiviats récoltée à la base de l'andain. L'utilisation d'une toile semi-perméable (géotextile) est plus appropriée que celle d'une toile imperméable (film de polyéthylène noir) particulièrement pour la période active du compostage.

### 7.4.4 COMPOSTAGE EN RÉACTEUR À LA FERME

Le compostage du fumier de bovins laitiers en réacteur fonctionnant 365 jours par année, apparaît à première vue intéressant : élimination de l'étape d'entreposage du fumier, temps de compostage rapide, production d'un compost de qualité uniforme et constante, réduction des lixiviats, etc..

En contre-partie, afin de minimiser le temps requis pour la supervision et l'opération du procédé par l'agriculteur, une fiabilité mécanique et un niveau d'automatisation élevés sont requis. Si on ajoute à ces exigences les caractéristiques physiques et hétérogènes du fumier de bovins laitiers, les procédés de compostage en continu deviennent rapidement complexes et onéreux dans le contexte de la ferme.

Le compostage en réacteur ne permet pas de contourner les problèmes liés aux caractéristiques inadéquates du fumier tel qu'on le retrouve habituellement sur les fermes. L'ajout de paille et l'essorage mécanique constituent des techniques complémentaires au compostage en réacteur qui sont nécessaires pour rencontrer les paramètres du compostage. À l'instar du compostage en andain, lorsque les paramètres de compostage sont atteints, les processus de compostage se déroulent de façon satisfaisante en réacteur.

Le compostage en réacteur n'élimine pas les besoins d'entreposage du compost avant son utilisation agricole. Pour conserver la valeur fertilisante du compost en éliminant les pertes à l'entreposage par lessivage et pour réduire les risques environnementaux qui en découlent, des mesures de protection sont requises (abri à compost, utilisation de toiles de recouvrement).

Globalement, les opérations d'essorage et de compostage en réacteur de la fraction solide ont occasionné une réduction d'environ 10 % de la masse totale de fumier à gérer (liquide d'essorage et fumier composté) lors des essais à la ferme.

Le compostage en réacteur n'a pas éliminé le problème des pertes d'azote. Pour un temps de compostage de 21 jours, les pertes d'azote sont estimées à 15 % par rapport au contenu initial du fumier essoré. Par contre, une part importante de l'azote du fumier frais se retrouve dans le liquide d'essorage. Les pertes d'azote de cette fraction liquide n'ont pas été déterminées. Si ces pertes étaient faibles, l'essorage du fumier frais et le compostage de la fraction solide pourraient représenter une technique qui permet de conserver plus d'azote que le compostage de l'ensemble du fumier.

Indépendamment du type de réacteur, ce dernier doit être protégé des intempéries. Il est donc difficile d'envisager l'implantation d'un système de compostage en réacteur sur une ferme et d'éviter les structures de protection du système ainsi que celles d'entreposage du compost.

### 7.4.5 COMPOSTAGE AVEC OU SANS RETOURNEMENT

La perte de volume a été deux fois plus grande (54 %) pour le compost retourné que pour le compost non retourné (27 %) lors des essais sur plate-formes. Une réduction de masse totale plus importante a été obtenue pour le tas retourné (58 %) comparativement au tas non retourné (42 %). Le seul fumier dont la valeur monétaire (en N-$P_2O_5$-$K_2O$) a diminué après le compostage, a été obtenue avec le traitement non retourné.

De plus, une production totale de lixiviats deux fois plus importante a été mesurée avec le compost non-retourné. En regard des résultats d'essais sur les plates-formes de béton il appert que que le lixiviat du compost statique proviendrait principalement du ruissellement de l'eau de pluie en surface du tas.

La mise à l'essai de cette technique s'est traduite par la production d'un compost non-homogène à la fin des essais. De plus, la destruction des mauvaises herbes n'a pas été obtenue. Par ailleurs, des pertes d'éléments fertilisants équivalentes aux composts retournés ont été observées avec le compost non-retourné. L'unique avantage de cette technique réside dans l'élimination des opérations de retournements.

## 7.5 ACTIONS CORRECTIVES

Les actions correctives à la ferme pour réduire les impacts environnementaux de la gestion des fumiers par compostage sont envisageables aux diverses étapes de la chaîne de gestion du fumier par compostage. Elles peuvent se pratiquer à l'étable, à l'entreposage ou lors du compostage en andains au champ. Le tableau 7.3 présente le résumé des coûts qu'implique chacune de ces actions correctives.

### 7.5.1 À L'ÉTABLE : Étape A

#### A1) Utilisation importante de paille à l'étable.

Dans certains cas, la quantité de paille est limitée par le système d'évacuation à environ 3 kg de paille/u.a.-j. La quantité de paille nécessaire pour diminuer de façon importante l'humidité du fumier requiert des manipulations supplémentaires, des coûts d'achats de pailles élevés et une aire d'entreposage couverte. Finalement, la surface de contact entre la paille et le purin n'est pas accrue avec l'augmentation de paille au dalot. L'utilisation de la paille dans le dalot n'est donc pas pleinement efficace et appropriée pour augmenter l'absorption des liquides à cette étape.

Le lieu d'utilisation de la paille apparaît donc important à considérer. En effet, dans le but d'éliminer la production de lixiviats au compostage, il serait plus logique et pratique d'introduire une partie de la litière au fumier après l'évacuation, compte tenu que l'augmentation de la quantité de paille à l'étable n'a pas permis d'absorber davantage de liquide au dalot. Au-delà de la quantité moyenne de paille, soit 2,1 kg/u.a.-j, l'utilisation de paille à l'étable n'apparaît pas être justifiée dans cette perspective. Il faut envisager d'augmenter l'absorption des liquides par l'addition au dalot de matériaux absorbants fins ou par une étape d'imprégnation subséquente. L'utilisation de paille à raison de 4 kg/u.a.-j à l'étable permet néamoins de favoriser le critère de porosité du fumier destiné au compostage subséquent.

#### A2) Utilisation de litières à l'étable, autre que la paille.

Cette technique est limitée par le coût et la disponibilité à la ferme des différentes litières. Des matériaux comme la ripe de pin et la tourbe absorberait plus de liquide dans le dalot que la paille dû à leurs capacités d'absorption volumique (CAE vol.) et

à leurs masses volumiques apparentes (MVA b.h) plus élevées (structure plus fine); le contact liquide-litière serait meilleur avec ces matériaux qu'avec la paille longue notamment.

**A3) Disposer d'un bassin d'imbibition à la sortie de l'étable.**

Cette technique requiert des équipements, des structures de recouvrement et de la litière supplémentaires. Le bassin d'imbibition n'est pas encore développé et l'entreposage en tas sous la montée d'écureur constitue une alternative qui permet aussi l'absorption des liquides par la litière. Dans les deux cas, les structures utilisées doivent permettre de récupérer la fraction liquide non absorbée et s'inscrire dans une suite d'actions logiques et raisonnées.

**A4) Utilisation d'une grille dans le fond du dalot pour la récolte du purin qui n'est pas absorbé lors de l'écurage.**

Cette technique requiert un purot de dimension plus importante pour l'entreposage du purin et des équipements permettant le transfert du purin dans le purot. Cette technique simple permet de diminuer l'humidité de la fraction solide du fumier et elle peut être considérée comme une technique d'essorage. Une quantité minimale de litière qui assure la propreté et le confort des animaux, doit être utilisée à l'étable. Cette pratique diminue donc, de façon globale à la ferme, la quantité de litière utilisée.

Finalement, cette technique représente un moyen simple de réduire l'humidité du fumier mais elle n'est pas encore très répandue à la ferme. Pour celui qui pratique le compostage, elle devrait constituer la première étape à réaliser pour réduire la TEE du fumier à l'étable destiné au compostage.

### 7.5.2 À L'ENTREPOSAGE : Étape B

**B5) Essorage naturel du fumier et entreposage du purin dans un purot.**

Cette technique requiert une gestion du fumier sous deux formes (solide et liquide) et exigent l'aménagement d'un purot à même l'entrepôt à fumier. La mise en place d'un système de récolte de la fraction essorée du fumier suite à l'entreposage, permet de réduire le volume de lixiviats lors du compostage et de conserver ainsi une plus grande quantité d'éléments fertilisants dans le compost.

### B6) Essorage mécanique du fumier.

L'essorage mécanique du fumier avant son entreposage permet l'obtention d'une fraction solide essorée dont les propriétés pour le compostage sont améliorées. De plus, le volume de lixiviats écoulé lors du compostage est plus faible. Par contre, cette technique augmente considérablement le volume de liquides à entreposer comparativement à la gestion conventionnelle (près du double de volume d'entreposage). Lors des essais, la qualité visée du liquide essoré n'a pas été atteinte. Une quantité importante de solides dans le liquide d'essorage risque de provoquer la formation d'un dépôt à l'entreposage.

Les essoreuses qui permettraient une bonne séparation des fractions liquides et solides du fumier de bovins sont dispendieuses (> 40 000 $), ce qui représente une contrainte majeure pour le développement de cette avenue.

### B7) Utilisation de litière sous le tas de fumier ou dans le tas de fumier à l'entreposage.

Ces deux pratiques requièrent des quantités importantes de litière à ajouter au fumier pour ne pas avoir d'écoulement de lixiviats au sol. De plus, le recouvrement du fumier durant l'entreposage doit absolument être fait si l'on veut minimiser la production de lixiviats. Si ces deux conditions sont respectées, le plancher de béton étanche pour l'entreposage pourrait être remplacé par un plancher en sol, ce qui se traduirait par une diminution importante du coût de la structure d'entreposage du fumier.

### B8) Entreposage du fumier dans un entrepôt couvert.

L'entreposage couvert du fumier avec un purot pour l'entreposage des liquides permet d'éliminer l'ajout d'eau supplémentaire au fumier provenant des précipitations. Il permet donc de diminuer ou de maintenir l'humidité du fumier et de réduire la production de purin à gérer. Cette technique est avantageuse dans plusieurs cas pour l'entreposage du fumier et représente aussi pour le compostage une avenue intéressante. Certaines fermes impliquées dans le compostage du fumier utilisent déjà cette pratique.

### B9) Compostage non-contrôlé du fumier dans l'entrepôt à fumier (couvert et sur plancher de béton) avec retournements facultatifs.

Si cette technique ne correspond pas nécessairement à la définition même du compostage, elle représente néanmoins une pratique sécuritaire pour l'environnement dans la mesure où la fraction liquide est gérée adéquatement. Elle permet d'utiliser des équipements déjà disponibles pour la manipulation du fumier (pelle de tracteur et épandeur à fumier), mais exige des manipulations supplémentaires par rapport à la gestion conventionnelle. La qualité du compost obtenu par cette technique se situe entre celle du fumier frais et celle des composts commerciaux. La quantité de litière utilisée ne devrait pas être inférieure à 4 kg/u.a.-j.

### B10) Compostage accéléré et contrôlé du fumier en réacteur

Cette technique représente un moyen efficace d'obtenir rapidement un compost de qualité acceptable pour les besoins de la ferme. Le principal obstacle concernant cette technique est le coût que représente l'acquisition du réacteur et l'aménagement de celui-ci dans un bâtiment fermé, à l'abri des intempéries. De plus, le système implanté à la ferme doit être mécaniquement fiable et d'entretien simple. L'unité pilote mise à l'essai a permis de démontrer que l'atteinte de ces deux derniers objectifs nécessite une technologie mécaniquement complexe et coûteuse.

Si la mise en place du compostage accéléré en réacteur a pour objectif de diminuer le coût et la dimension des structures d'entreposage du fumier, il ne permet cependant pas d'éliminer complètement ces structures.

Compte tenu de la complexité associée aux réacteurs, le compostage du fumier essoré en pile aérée (par soufflante ou par aspiration) sous abri dans l'entrepôt à fumier apparaît plus prometteur puisqu'il permettrait simultanément le compostage et l'entreposage du fumier/compost de façon sécuritaire pour l'environnement. Le niveau de technologie d'un tel procédé se situe entre le compostage en réacteur et l'entreposage du fumier.

## 7.5.3 AU COMPOSTAGE EN ANDAIN AU CHAMP : Étape C

### C11) Utilisation de litière dans le fumier lors de la mise en andain

Les arguments qui militent en faveur de cette pratique sont les mêmes que ceux exposés en B7 (utilisation de litière au fumier lors de l'entreposage). Cette pratique permettrait de diminuer l'humidité du fumier et le volume de lixiviats mais nécessiterait des quantités de litière additionnelles et des coûts supplémentaires importants. L'ajout de litière au fumier lors de la mise en andains permettrait d'amorcer plus rapidement les processus de compostage mais la production de lixiviats ne serait pas pour autant éliminée.

### C12) Utilisation de litière sous l'andain comme lit absorbant

L'utilisation d'un lit absorbant sous l'andain permet de capter les lixiviats qui se drainent du compost. Pour le compost en andain au champ qui serait couvert d'une toile éliminant entièrement l'apport d'eau par les précipitations, une quantité de paille d'environ 1,5 à 2 kg/u.a.-j serait nécessaire pour absorber la totalité du purin qui s'écoule du compost au cours d'une saison de compostage d'environ 140 jours. Cela représente un déboursé annuel récurrent de plus de 2 000 $. L'apport de paille à la base du compost contribue à l'augmentation de la matière organique du compost puisque après quelques retournements, elle est complètement mélangée au compost. Pour celui qui peut utiliser une quantité de paille équivalente à 4 kg/u.a.-j, le fractionnement de cette quantité au dalot et à l'andain est intéressant d'un point de vue environnemental.

### C13) Recouvrement du compost au cours du compostage

Sous nos conditions climatiques, le recouvrement du compost à l'aide de toile est une technique qui apparaît indispensable tant du point de vue agronomique qu'environnementale. D'une façon simple, elle permet d'éliminer l'apport en eau par les précipitations, de diminuer l'humidité du fumier, le volume de lixiviats produit et les pertes d'éléments fertilisants. Le coût d'acquisition d'une toile géotextile, pour composter en totalité le fumier produit annuellement par une ferme moyenne de 47 u.a., serait d'environ 3 000 $ (TEXEL, 1993). Les interrogations que suscitent l'utilisation de ce type de toile concernent l'efficacité réelle de celle-ci sous des

précipitations de fortes intensités. La démonstration économique de cette pratique reste à faire si l'on veut favoriser l'adoption de cette pratique.

Des essais de compostage sur des plates-formes étanches permettraient d'obtenir de façon précise l'efficacité réelle de ce type de toiles et de préciser le coût d'amortissement du matériel.

L'utilisation de toiles sur les andains de compost ne permet pas d'éliminer la production de lixiviats inhérente à un fumier trop humide. Cet aspect apparaît particulièrement préoccupant au cours des premières semaines de compostage.

### 7.5.4 RÉSUMÉ DES ACTIONS CORRECTIVES À POSER À LA FERME

On retrouve au tableau 7.3 l'ensemble des coûts, de la quantité de paille et des besoins d'entreposage du purin qu'implique chacune des actions correctives présentées dans ce chapitre pour optimiser le compostage des fumiers à la ferme et diminuer l'impact environnemental de cette pratique.

Selon les essais sur plate-formes de béton au CRIQ, le compostage des fumiers en andain occasionnerait des pertes monétaires annuelles en éléments fertilisants comprises entre 1 877 $ et 3 468 $, si la totalité du fumier de la ferme était composté (474 t.m. de fumier à la reprise, BIOREX 1989). Ce montant ne tient pas compte des pertes qui se produisent lors de l'entreposage du fumier.

La paille ajoutée au fumier représente un déboursé annuel récurrent variant entre 3 242 $ (2,1 kg/u.a.-j) et 23 159 $ (15,0 kg/u.a.-j) selon la quantité utilisée. L'utilisation de cette litière implique aussi des manipulations supplémentaires de paille à l'étable, de fumiers à l'entreposage et de composts lors du compostage. Le risque de production de lixiviats pour un fumier dont la quantité de paille serait très élevée (plus de 10 kg/u.a.-j) n'est pas entièrement éliminé puisque aucun contrôle n'est fait sur les précipitations reçues par le fumier lors de l'entreposage et le compost lors du compostage.

Le recouvrement du compost en cours de compostage à l'aide de matériaux perméables à l'air qui protègent le compost des précipitations représente de faibles déboursés (environ 3 000 $ pour la ferme moyenne) par rapport aux avantages que cette technique procure (fumier plus sec et diminution des pertes en éléments fertilisants). Des essais complémentaires rigoureux devraient être réalisés afin de préciser le type de toiles qui permet la réduction maximale des lixiviats, de déterminer

le temps requis pour rentabiliser leur emploi et leurs effets sur le déroulement des processus de compostage.

L'achat d'une essoreuse mécanique sophistiquée pour diminuer l'humidité du fumier ne représente pas actuellement une pratique intéressante à considérer. Le coût d'achat (plus de 40 000 $) de cet équipement est important et le volume de purin à entreposer est augmenté par rapport à la gestion conventionnelle du fumier. L'utilisation de techniques simples de séparation de la fraction liquide du fumier est la seule avenue économique intéressante à la ferme. A titre d'exemple, l'emploi de drains dans le fond du dalot permettant de récolter le purin devrait être envisagé.

Le compostage du fumier dans un entrepôt couvert nous apparaît une avenue prometteuse et environnementalement sécuritaire en dépit des déboursés importants inhérents à la structure. Le développement de structures d'entreposage durables, économiquement abordables et adaptées aux équipements utilisés sur la ferme laitière pourrait rendre cette avenue intéressante à la ferme laitière.

TABLEAU 7.3 : RÉSUMÉ D'ACTIONS CORRECTIVES A LA FERME POUR OPTIMISER LE COMPOSTAGE DES FUMIERS

| Techniques alternatives | Litière | | | Purot | | Autres coûts ($) et remarques |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Quantité (kg/u.a.-j) | Quantité (t.m.) | Coût annuel ($/an) | Masse de purin (t.m.) | Coût ($) | |
| A: à l'étable | 2,1 | 36 | 3 242 | - | - | fumier + paille : 600,5 t.m. à une TEE de 84,0 % |
| A1 : plus de paille | 0,9 | 15,4 | 1 390 | - | - | fumier + paille : TEE 82,9 % |
| A2 : autres litières | 0,9 | " " | " " | - | - | " " |
| A3 : bassin d'imbibition | 0 à 3,9 | 0 à 66,9 | 0 à 6 021 | - | - | TEE du fumier solide : 82,3 % bassin : 2 000 à 3 000 $ |
| A4 : séparation du purin | - | - | - | 76,3 | 4 960 [1] | canalisation et pompe : ≈ 1 500 $ |
| B: à l'entrepôt | - | - | - | - | - | - |
| B5 : essorage naturel [2] | - | - | - | 150 | 9 757 [1] | TEE du fumier d'environ 80 % |
| B6 : essorage mécanique [3] | - | - | - | 300 | 12 900 [4] | TEE du fumier d'environ 75 % essoreuse : + 40 000 $ |
| B7 : plus de paille | 2,0 à 3,9 | 34,3 à 66,9 | 3 088 à 6 021 | - | - | TEE du fumier de 79,2 % à 81,4 % |
| B8 : entrepôt couvert | - | - | - | - | - | 60 - 75 $/m² de surface de l'entrepôt |
| B9 : compostage en entrepôt | - | - | - | - | - | + temps pour le retournement du compost |
| B10 : compostage en réacteur | - | - | - | - | - | réacteur : ≈ 100 000 $ |
| C: en andain | - | - | - | - | - | - |
| C11 : plus de paille | 2,0 à 3,9 | 34,3 à 66,9 | 3 088 à 6 021 | - | - | - |
| C12 : lit absorbant | 1,5-2,0 | 25,7 à 34,3 | 2 316 à 3 088 | - | - | - |
| C13 : couvrir l'andain | - | - | - | - | - | toile : ≈ 3 000 $ |
| C14 : andain statique | - | - | - | - | - | - |

1) coût du purot : 65 $ / m³ (CREAQ, 1990)
2) 25 % de la masse de fumier va dans le purot sous forme de purin par essorage **naturel**
3) 50 % de la masse de fumier va dans le purot sous forme de purin par essorage **mécanique**
4) coût du purot : 43 $ / m³ (CREAQ, 1990)

## 7.6 SCÉNARIOS DE COMPOSTAGE APPLICABLES À LA FERME LAITIÈRE

À la lumière des résultats obtenus par la réalisation des diverses investigations, 4 scénarios de compostage du fumier de bovins laitiers ont été identifiés comme avenues de gestion du fumier dans le contexte pratique de la ferme. L'élaboration de ces scénarios est basée sur 2 grandes approches. La première approche consiste à gérer la totalité du fumier sous forme solide en éliminant la production et la gestion de lixiviats. La seconde approche s'appuie sur une gestion adéquate de la fraction solide par compostage et de la fraction liquide entreposée. Les scénarios de compostage élaborés visent tous à minimiser l'impact environnemental du procédé par une gestion adéquate des fractions liquide et solide du fumier.

Aucun des 4 scénarios proposés n'utilise le compostage accéléré en réacteur. Ce type de procédé en continu exige un niveau de mécanisation et d'automatisation élevé qui se traduit par des investissements élevés. Conséquemment, il s'adresse à des exploitations de plus grande taille. Le compostage en réacteur n'élimine pas la nécessité d'entreposer adéquatement le fumier composté et la mise en place d'une étape supplémentaire au mode de gestion conventionnel du fumier de bovin laitier. De plus, le compostage en réacteur n'empêche pas le besoin d'un conditionnement du fumier que ce soit par l'ajout d'absorbant au fumier ou par essorage mécanique ou naturel du fumier si l'on veut que les processus de compostage se déroulent de façon optimale et rapide.

Les 4 scénarios qui nous sont apparus les plus intéressants sont décrits aux figures 4.1 à 4.4 et aux sections 7.6.2.1 à 7.6.2.4. Pour chacun de ces scénarios, nous avons calculé le coût des équipements, des structures et des absorbants nécessaires pour composter de façon adéquate. Par contre, les coûts de main-d'oeuvre, d'amortissement d'équipements et de structures et les autres coûts inhérents à ces scénarios n'ont pas été évalués.

Voici les 4 scénarios de compostage.

Gestion solide du fumier

→ 1B Utilisation massive de litière

→ 2A Absorption complète des liquides au dalot

Gestion solide et liquide du fumier

→ 1A Séparation des urines dans le dalot

→ 2B Essorage mécanique du fumier

### 7.6.1 HYPOTHÈSES DE CALCULS POUR LES SCÉNARIOS DE COMPOSTAGE

Les principales hypothèses retenues pour les calculs du volume de fumier, du coût de l'entreposage, de la toiture rigide pour la couverture du fumier ainsi que du coût du purôt pour les 4 scénarios proposés sont les suivantes :

1) Volumes du fumier (Vf)

$Vf = Vd + 1/2 * Va$

Vd : volume des déjections (49 L/u.a.-j)
Va : volume des absorbants
Mva de la paille dans le fumier : 100 kg/m$^3$
Mva de la sciure de bois dans le fumier : 200 kg/m$^3$

Le temps d'entreposage du fumier est de 200 jours pour 47 u.a. avec une production de 49 L/u.a.-j de déjections (fèces et urines).

2) Structure pour l'entreposage du fumier à 79 $/m$^3$ (BPR, 1993)

3) Coût pour la couverture des structures d'entreposages à 32 $/m$^3$ (BPR, 1992)

4) Coût pour la construction d'un purôt à 50 $/m$^3$ (CREAQ, 1990)

5) Le volume de purin à entreposer qui s'écoule d'un tas de fumier est calculé en tenant compte de la teneur en eau initiale du fumier et de la teneur en eau maximale de 75 %, après le ressuyage de celui-ci.

6) La quantité de matériel du lit absorbant sous l'andain est calculée en considérant le volume de lixiviat qui s'écoulerait du compost en andain au champs d'une TEE de 75 % jusqu'à une TEE de 70 % et en hypothétisant la CAE b.h. (capacité d'absorption en eau) du matériel absorbant à 3 kg eau absorbée par kg d'absorbant.

## 7.6.2 DESCRIPTION DES SCÉNARIOS DE COMPOSTAGE

### 7.6.2.1 Scénario 1B). Utilisation massive de litière

**Description :**

- quantité maximale de litière à l'étable : 15 kg/u.a.-j de paille; (directement à l'étable et/ou à la sortie du fumier dans l'entrepôt)
- aucun liquide de ressuyage à l'entreposage du fumier, absence de purot pour l'entreposage du purin;
- absence de plancher étanche pour l'entreposage du fumier;
- couverture du fumier à l'entreposage pour le protéger des précipitations (entrepôt rudimentaire).

Le scénario 1B constitue en ce sens une approche extrême par l'utilisation d'une quantité de litière équivalente à 15 kg de paille / u.a.-j. Une quantité maximale de litière permise par l'équipement d'évacuation est disposée à l'étable alors qu'une autre partie de litière est ajoutée à l'entreposage du fumier couvert afin de réduire la TEE du fumier à 70 %. Cette approche rejoint celle adoptée depuis de nombreuses années par les producteurs industriels de composts à base de fumier.

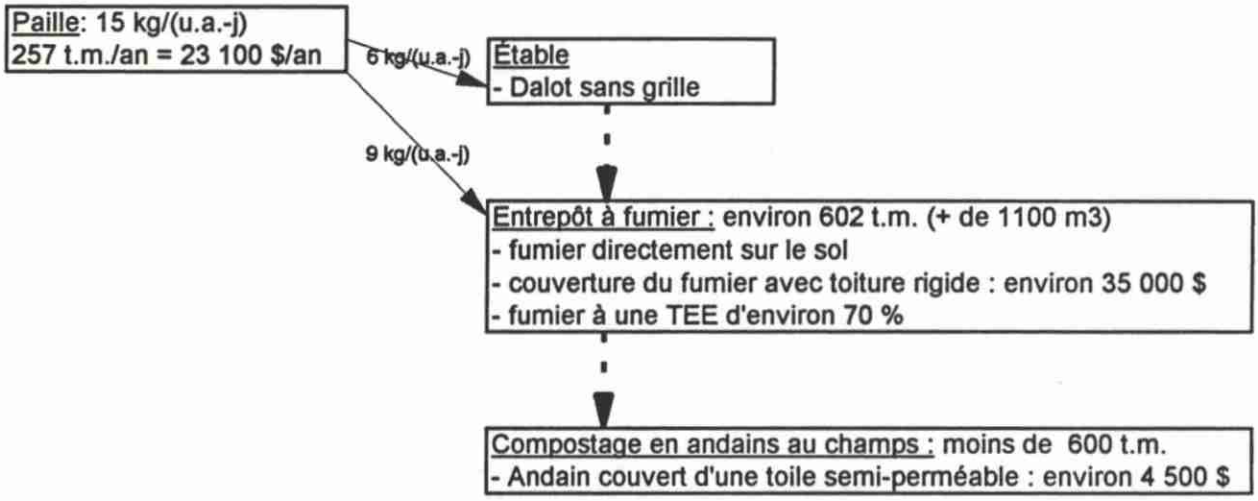
### 7.6.2.2 Scénario 2B). Essorage du fumier et utilisation du minimum de litière

**Description :**

- quantité minimale de litière à l'étable : 2 kg/u.a.-j de paille;
- essorage mécanique du fumier à la sortie de l'étable;
- entreposage de la fraction liquide essorée dans un purot;
- plancher de béton étanche non nécessaire pour l'entreposage du fumier et du compost solide (TEE < 70 %). Un lit absorbant équivalent à environ 1 kg/u.a.-j de paille est disposé sous le tas de fumier pour absorber les lixiviats qui s'écoulent du fumier;
- couverture du fumier essoré et pré-compostage dans l'entrepôt à longueur d'année;
- compostage en andains au champs avec une toile semi-perméable.

Le scénario 2B est basé sur l'utilisation d'une essoreuse mécanique permettant de réduire la TEE de la fraction solide du fumier essoré à 75 % ou moins. Actuellement, la mise en place d'un tel scénario est rendue difficile en raison de l'absence d'équipements d'essorage adaptés au fumier solide tel qu'on le produit sur la ferme à la sortie du système d'évacuation. Ce scénario permettrait néanmoins de minimiser la quantité de litière requise à environ 2 kg/u.a.-j, de composter la fraction solide à une TEE acceptable, de minimiser la production de lixiviats en cours de compostage et d'entreposer la fraction liquide essorée de façon sécuritaire pour l'environnement et de façon à maximiser la conservation des éléments fertilisants dans le purin.

Les 2 scénarios suivants 1A) et 2A) permettraient un compostage optimisé tout en étant adaptés à la gestion actuelle du fumier à la ferme.



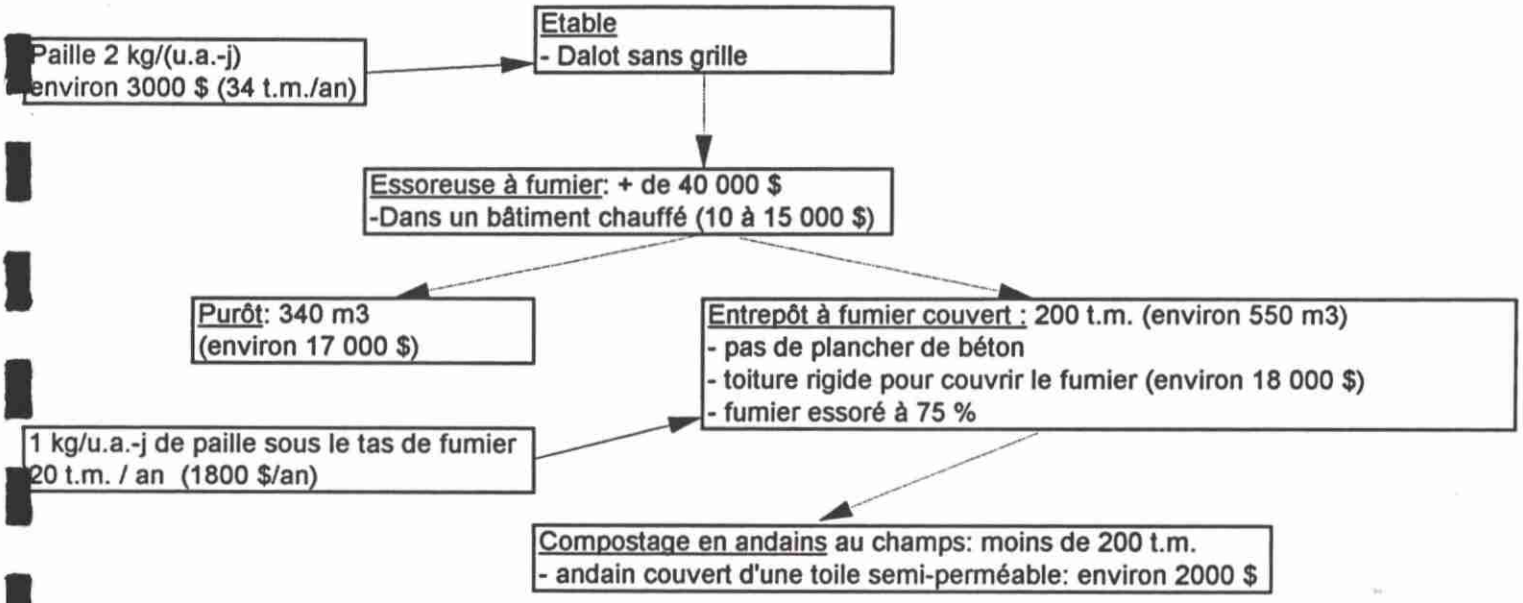

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| - Pas de purot pour le purin et aucun liquide à gérer<br>- Pas de plancher de béton étanche<br>- Entreposage du fumier directement sur le sol<br>- Précompostage du fumier l'hiver dans l'entrepôt<br>- Devrait permettre de maximiser la conservation des éléments fertilisants<br>- La paille ajoutée au fumier permet de composter de façon optimisée | - Augmentation importante de la quantité de paille, du fumier et du compost à gérer<br>- Approvisionnement et manipulation supplémentaire de l'absorbant choisi<br>- L'utilisation des évacuateurs souterrains n'est pas possible à cause de la quantité important de paille |

Observations et remarques

Cette façon d'opérer correspond au mode de fonctionnement utilisé par les industriels du compostage qui utilisent en mélange avec le fumier, de grandes quantités d'absorbants pour optimiser les processus de compostage.

**Figure 7.1 : Scénario 1B). Utilisation massive de litière**

**Scénario 2B) Essorage mécanique du fumier**




| Avantages: | Inconvénients: |
|---|---|
| - Quantité minimale de fumier et de compost à manipuler<br>- Transport d'un fumier pré-composté au champs;<br>- L'essorage permet d'optimiser certains paramètres du compostage tel que la TEE, le C/N | - cout d'acquisition important pour l'essoreuse (+ de 40 000)<br>- entretien et opérations de l'essoreuse<br>- construction d'un purôt de plus grande dimension<br>- transport et épandage d'un plus grand volume de purin |

Observations / remarques

- intéressant pour l'agriculteur qui veut minimiser la quantité de litière venant de l'extérieur de la ferme.
- l'agriculteur qui adopte ce scénario devra avoir à sa disposition deux types d'équipements pour la gestion de ces fumiers (solides et liquides).
- nécessité de mettre au point une essoreuse mécanique adaptée au fumier.

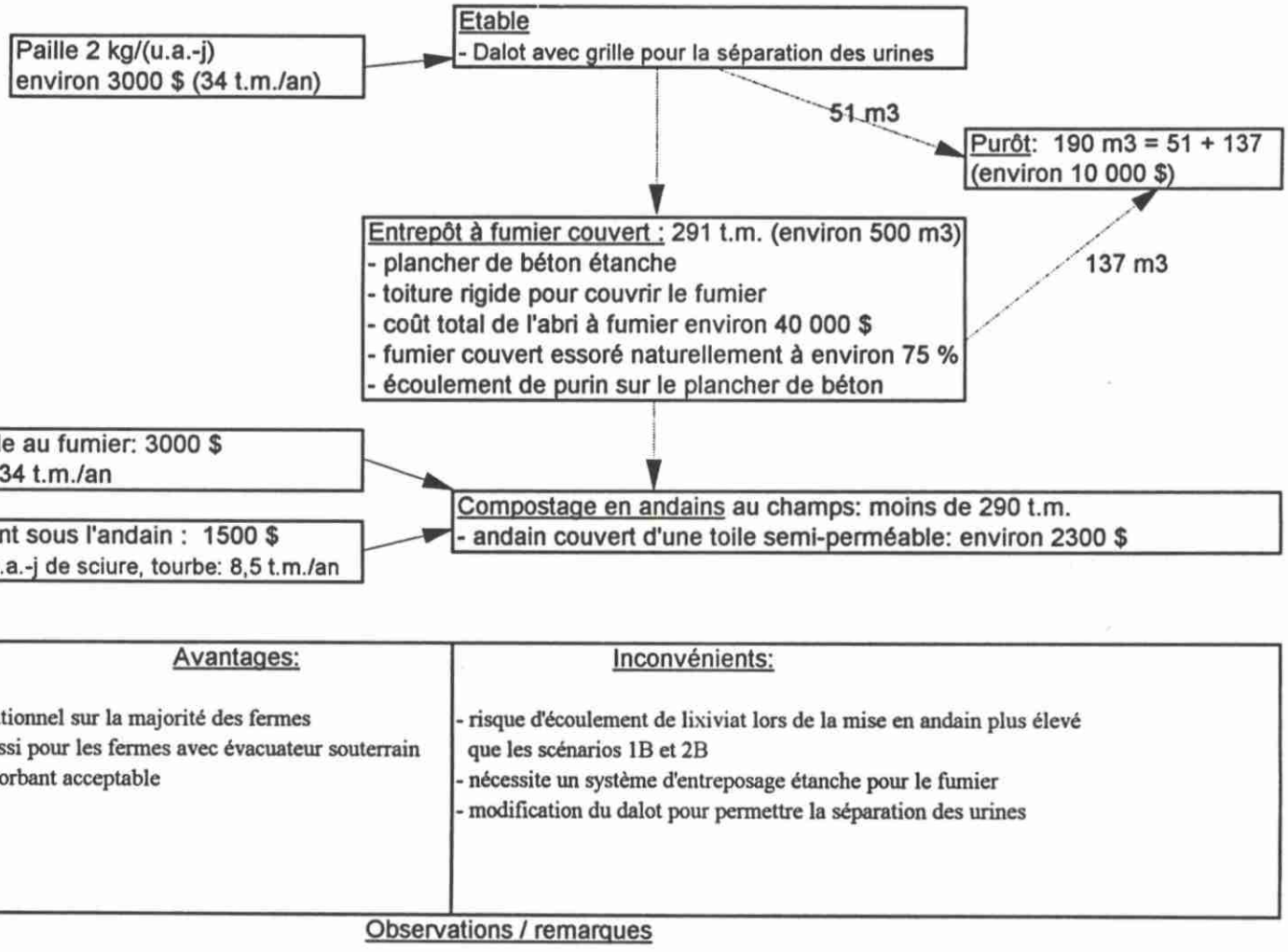
**Figure 7.2 : Scénario 2B). Essorage mécanique du fumier**

### 7.6.2.3 Scénarios 1A). Séparation des urines dans le dalot

**Description :**

- quantité minimale de litière à l'étable, 2 kg/u.a.-j de paille;
- séparation des liquides du dalot à l'aide d'une grille métallique dans le fond du dalot;
- entreposage combiné du purin récolté par la grille du dalot et produit par le tas de fumier entreposé sur le plancher de béton;
- entreposage du fumier sur un plancher de béton étanche;
- couverture du fumier à l'entreposage;
- récolte du purin qui s'écoule du fumier à l'entreposage;
- ajout de paille au fumier juste avant sa mise en andain à une dose de 2 kg/u.a.-j. (pour augmenter la porosité et abaisser l'humidité du fumier);
- compostage en andain du fumier avec retournements mécaniques;
- couverture de l'andain de compost avec une toile semi-perméable;
- absorbant à la base de l'andain (environ 1 kg/u.a.-j de sciure de bois, de tourbe ou autre absorbant à granulométrie fine). La quantité d'absorbant sous l'andain combiné à l'utilisation d'une toile devrait être validées par des essais.

Pour ce scénario, environ 5 kg/u.a.-j d'absorbant serait nécessaire pour composter les fumiers de façon adéquate et acceptable pour la protection de l'environnement. L'utilisation d'une quantité moyenne d'absorbant est permise grâce à la gestion efficace des fractions liquides et solides du fumier et par l'utilisation d'équipements conçus à cette fin (grille métallique dans le fond du dalot, entrepôt couvert et étanche, purot, toile semi-perméable de recouvrement des andains, lit absorbant sous l'andain). Ce scénario modifie d'une façon importante les opérations de gestion du fumier tout en exigeant l'installation et la modification de structures ou d'équipements qui actuellement ne se retrouvent pas sur la majorité des fermes. Toutefois, l'implantation de ces façons de faire sont rapidement applicables sur les fermes québécoises.




| Avantages: | Inconvénients: |
|---|---|
| - Système opérationnel sur la majorité des fermes<br>- Fonctionne aussi pour les fermes avec évacuateur souterrain<br>- Quantité d'absorbant acceptable | - risque d'écoulement de lixiviat lors de la mise en andain plus élevé que les scénarios 1B et 2B<br>- nécessite un système d'entreposage étanche pour le fumier<br>- modification du dalot pour permettre la séparation des urines |

Observations / remarques

- scénario adapté à la gestion actuelle du fumier
- le fumier est géré sous deux formes; solide et liquide

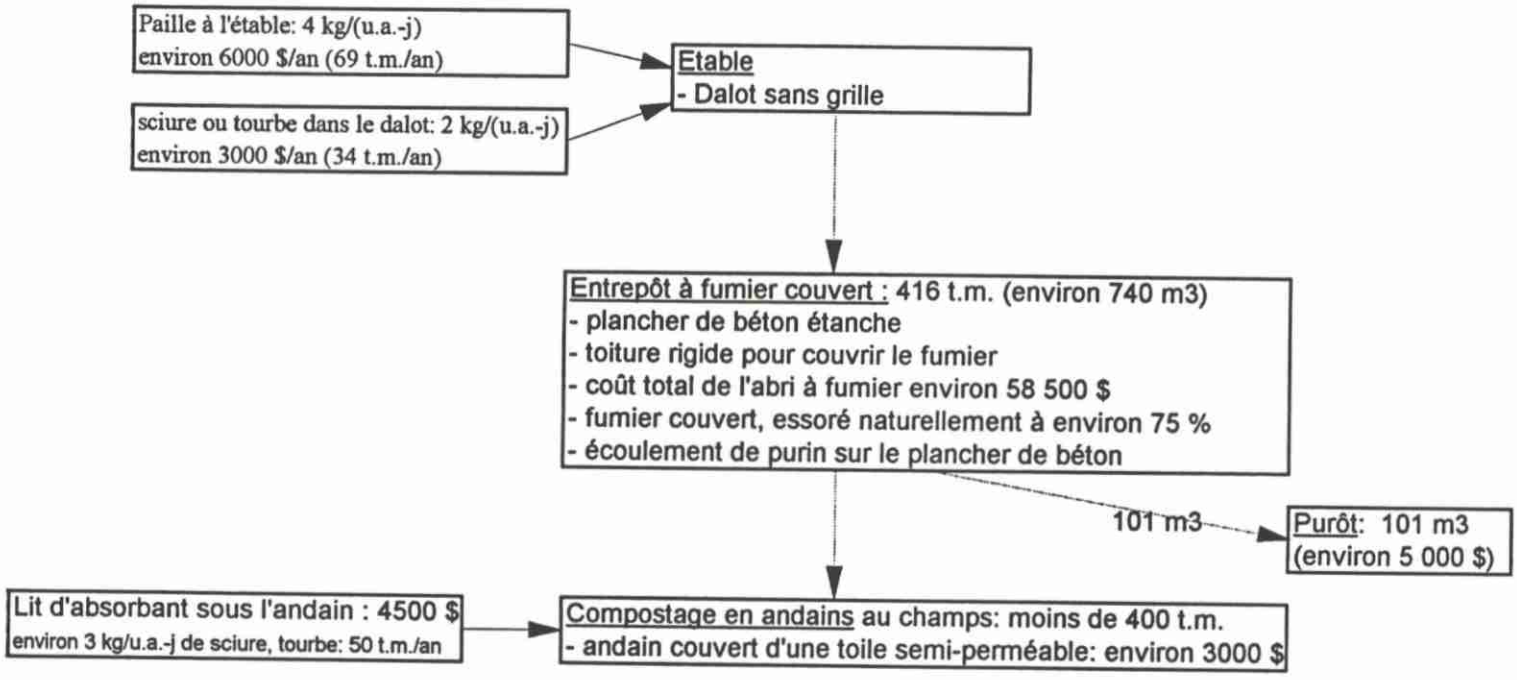
**Figure 7.3 : Scénario 1A). Séparation des urines dans le dalot**

#### 7.6.2.4 Scénario 2A). Absorption complète des liquides au dalot

**Description :**

- 4 kg/u.a.-j de paille à l'étable;
- environ 2 kg/u.a.-j de sciure de bois, de tourbe ou autre matériaux à granulométrie fine dans le fond du dalot pour absorber les liquides du dalot résiduels. La quantité utilisée pour chacun des matériaux devrait être validée par des essais;
- aucune grille pour la séparation des urines au dalot;
- entreposage du fumier dans un abri à fumier couvert (plancher de béton étanche et toiture rigide);
- récolte du purin qui s'écoule du fumier à l'entreposage;
- compostage en andain au champs du fumier et retournement mécanique;
- couverture de l'andain de compost avec une toile semi-perméable;
- lit absorbant avec une quantité équivalente de sciure, de tourbe ou de paille d'environ 3 kg/u.a.-j. La quantité à utiliser devrait être validée par des essais au champs.

Le scénario 2A représente une avenue basée sur l'absorption complète des liquides au dalot combinée à l'utilisation de toiles de recouvrement et d'un lit absorbant pour les opérations de compostage. Dans ce scénario, l'entreposage des liquides qui s'égouttent du tas de fumier est requis. L'intérêt de ce scénario repose sur la possibilité d'implanter rapidement ces opérations au mode de gestion actuellement pratiqué sur l'ensemble des exploitations laitières. Il nécessite l'utilisation d'une quantité importante de litière équivalente à environ 9 kg/u.a.-j et la mise en place d'un entrepôt à fumier couvert avec un plancher de béton étanche et un purot pour l'entreposage des liquides de ressuyage du fumier.




| Avantages: | Inconvénients: |
|---|---|
| - Système opérationnel sur la majorité des fermes<br>- Aucun liquide au dalot<br>- Quantité d'absorbant acceptable<br>- Purot environ deux fois plus petit que le scénario 1A | - risque d'écoulement de lixiviat lors de la mise en andain plus élevé que les scénarios 1B et 2B<br>- nécessite un système d'entreposage étanche pour le fumier |

Observations / remarques

- scénario adapté à la gestion actuelle du fumier
- le fumier est géré sous deux formes; solide et liquide

**Figure 7.4 : Scénario 2A). Absorption complète des liquides au dalot**

## 7.7 DISCUSSION

Les 4 scénarios établis précédemment permettent de composter adéquatement la fraction solide du fumier de bovins laitiers tout en minimisant les risques de production de lixiviats dans l'environnement. Le choix du scénario de compostage doit se faire en regard du contexte particulier de chaque exploitation agricole. On retrouve au tableau 7.4 le résumé des scénarios de compostage proposés.

Le scénario 1B correspond à l'approche d'une gestion solide complète du fumier par compostage. Il s'agit du seul scénario qui permet d'éliminer la mise en place d'un purot et d'entreposer sous abri le fumier sur le sol. Les scénarios 1A et 2B qui nécessitent l'installation de purot, présentent un intérêt pour l'entreprise dont la gestion d'une fraction solide et liquide ne constitue pas un obstacle pour la manipulation et la disposition aux champs de ces deux fractions. Les quantités de litière requises pour ces scénarios varient de 3 à 5 kg d'absorbants/u.a.-j.

Selon les scénarios envisagés, la quantité de purin à gérer sera variable. On retrouve par ordre décroissant de volume de purin à gérer les scénarios 2B (essorage du fumier), 1A (séparation des urines au dalot), 2A (absorption des urines au dalot) et 1B (litière maximale) ou en théorie aucun liquide ne devrait être produit. En ce qui concerne la quantité d'absorbant à utiliser le classement des scénarios est inversé. Le scénario 2B est le scénario qui permet d'entreposer et de composter la plus faible quantité de fumier solide. Ensuite on classe par ordre croissant les scénarios 1A, 2A et 1B. C'est donc le scénario avec litière maximale qui occasionne l'entreposage et le compostage de la plus grande quantité de fumier.

Les 4 scénarios incluent la mise en place d'un entrepôt à fumier. L'entreposage du fumier sur le sol est envisageable pour les scénarios 1B et 2B puisque les opérations requises permettent d'abaisser de façon importante la teneur en eau du fumier destiné au compostage. Les scénarios 1A et 2A exigent quant à eux à l'entreposage un plancher étanche permettant de canaliser les lixiviats dans un purot.

Pour tous les scénarios, l'utilisation de toiles de recouvrement semi-perméables est recommandée afin d'éliminer la production de lixiviats lors du compostage et de préserver la valeur fertilisante du compost. Les scénarios 1A et 2A exigent en plus, l'application de matériaux absorbants sous les andains de compost correspondant à des doses d'application qui sont respectivement de 1 et 3 varient entre 1 et 3 kg/u.a.-j.

## TABLEAU 7.4 : RÉSUMÉ DES SCÉNARIOS DE COMPOSTAGE

| Approche | Gestion solide | | Gestion solide et liquide | |
|---|---|---|---|---|
| Scénarios | 1B Extrême | 2A Compromis | 1A Compromis | 2B Extrême |
| Descriptif | Litière | Absorption au dalot | Séparation des urines | Essorage du fumier |
| **Étable** | | | | |
| Quantité de litière totale [1] | 15 | 9 | 5 | 3 |
| Sous les animaux [1] | 6 | 4 | 2 | 2 |
| Fond du dalot [1] | - | 2 | - | - |
| Dalot drainant | non | non | oui | non |
| **Entrepôt** | | | | |
| Toiture | oui | oui | oui | oui |
| Purot | non | oui | oui | oui |
| Plancher | sol | béton | béton | sol |
| Quantité de litière [1] | 9 | - | - | - |
| **Compostage** | | | | |
| Quantité de litière [1] | - | - | 2 | 1 |
| Lit absorbant [1] | non | 3 | 1 | non |
| Toile de recouvrement | oui | oui | oui | oui |

1) Les quantités de litières sont en kg/u.a.-j

Le compostage du fumier incluant l'utilisation massive de litière (1B) ou l'emploi d'une essoreuse mécanique (2B) représente des alternatives extrêmes pour les deux approches de gestion solide ou solide/liquide du fumier. La première se heurte au problème de la disponibilité et du coût des absorbants alors que la seconde est actuellement freinée par l'absence d'équipements d'essorage adaptés au fumier de bovins laitiers solide.

Les scénarios 1A et 2A constituent des alternatives de compostage qui sont adaptées à la gestion actuelle du fumier à la ferme laitière et qui pourraient être mis en place rapidement pour celui qui opte pour une gestion du fumier par compostage. Dans le contexte pratique de la ferme laitière, ces deux scénarios devraient être privilégiés pour celui qui désire implanter rapidement le compostage du fumier.

## 7.8 CONCLUSION

Le compostage du fumier de bovins laitiers constitue un mode de gestion du fumier qui implique des opérations supplémentaires à celles requises par les modes conventionnels de gestion des fumiers et ce, quelle que soit la technique adoptée. L'implantation du compostage à la ferme requiert une série de modifications relativement aux manipulations, aux équipements et aux structures existantes. Ces modifications découlent principalement des contraintes liées au processus de compostage, des exigences environnementales et du contexte climatique québécois.

L'ensemble des points concernant l'utilisation de la litière et la gestion solide des fumiers dans le contexte pratique de la ferme, nous porte à croire que la gestion des liquides constitue la préoccupation et la contrainte majeures du développement du compostage du fumier de bovin à la ferme.

D'un point de vue agronomique, la production de lixiviats avant ou pendant le compostage se traduit par des pertes importantes d'éléments fertilisants. D'un point de vue environnemental, les lixiviats produits lors de la gestion des fumiers par compostage constituent une charge polluante. Ils doivent donc être gérés en conformité avec la réglementation existante.

La diminution de la teneur en eau du fumier de bovins laitiers avant compostage apparaît une nécessité pour minimiser la production de lixiviats et pour respecter les paramètres de compostage. Pour ce faire, 2 groupes d'actions peuvent être envisagés soit : l'utilisation importante de litière ou l'essorage du fumier.

L'emploi de litière se heurte aux quantités importantes requises pour atteindre les paramètres de compostage et éliminer la production de lixiviats. L'ajout de litière dans le but d'éviter la production de lixiviats au compostage représente des déboursés supplémentaires pour l'agriculteur et n'apparaît pas une alternative unique attrayante. De plus, cette pratique n'élimine pas les besoins de recouvrement du compost, compte tenu de la précipitation moyenne annuelle élevée au Québec. Le recouvrement des andains au champ à l'aide de toiles constitue une méthode simple, peu onéreuse et intéressante pour conserver la valeur fertilisante du compost en réduisant la lixiviation.

L'essorage mécanique du fumier de bovins laitiers se heurte à l'absence d'équipements fiables, adaptés au contexte de la ferme et à prix abordable. Cette avenue est intéressante pour le compostage de la fraction essorée du fumier mais entraîne la production d'une quantité importante de purin qui s'ajoute à la gestion de la fraction solide.

La mise en place d'un procédé de compostage en réacteur ajoute une étape supplémentaire à la gestion conventionnelle du fumier (évacuation, entreposage, épandage). La complexité mécanique et les coûts d'implantation de ce type de système rendent le compostage en réacteur à la ferme peu intéressant économiquement.

Dans le contexte pratique de la ferme laitière, 2 scénarios de compostage adaptés à la gestion actuelle du fumier ont été identifiés. Tout en minimisant l'impact environnemental du procédé, ces scénarios pourraient être mis en place rapidement sur la majorité des fermes laitières. Les 2 scénarios sont basés sur l'utilisation de quantités réalistes de litière (5 ou 9 kg d'absorbants/u.a.-j), la mise en place d'un entrepôt à fumier muni d'un plancher étanche, l'utilisation d'un lit absorbant sous l'andain et l'emploi de toiles semi-perméables sur le compost.

Les résultats obtenus par la réalisation de ce projet de recherche apportent plusieurs éléments de réponses quant à la place du compostage à la ferme. Le compostage du fumier à la ferme se heurte à la difficulté d'établir les coûts/bénéfices de divers techniques ou procédés. Tant que l'ensemble des bénéfices découlant du compostage et de l'utilisation du compost ne pourront être traduits en gains ou en pertes économiques, l'évaluation de la place du compostage à la ferme restera incomplète.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIOREX (1989). Le compostage du fumier à la ferme, étude de faisabilité technico-économique et évaluation des impacts agronomiques et environnementaux : rapport final préliminaire. Québec : Ministère de l'Environnement, 275 p.

BIOREX (1994). Bilan massique de deux régies du fumier incluant le compostage sur la ferme laitière québécoise. Rapport final préliminaire. Québec : Ministère de l'Environnement. 135 p.

Consultants BPR (1994). Communication personnelle.

Consultants BPR (1993). Développement et démonstration de nouveaux concepts «Évacuation-entreposage-reprise» des fumiers de bovins laitiers. Rapport préliminaire. Québec : Ministère de l'environnement. 65 p.

Consultants BPR (1992). Nouveaux concepts de gestion du fumier de bovins laitiers. Symposium sur la recherche et le développement en gestion environnementale des effluents d'élevages du Québec. Texte de conférences, 9 et 10 septembre Québec. p. 229 à 248

CPVQ et service du génie MAPAQ (1992). Structure d'entreposage des fumiers, lisiers et purins : manuel d'ingénierie. AGDEX-710. 135 p.

CREAQ (1990). Coûts de construction, structure d'entreposage des fumiers et lisiers. AGDEX 729/538. 2 p.

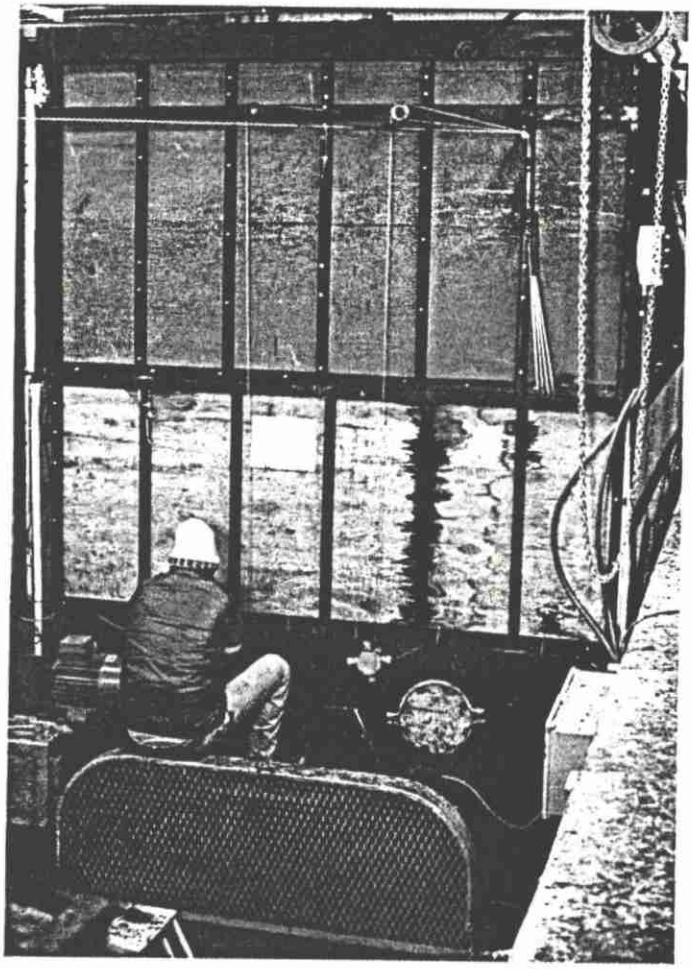
CRIQ (1993). Évaluation de la maturité des composts par respirométrie : recherche interne non publiée.

Rynk, Robert (1994). Status of Dairy Manure Composting in North America. Dans : Compost Science & Utilization, Winter 1994, Vol. 2, No 1. p. 20-26.

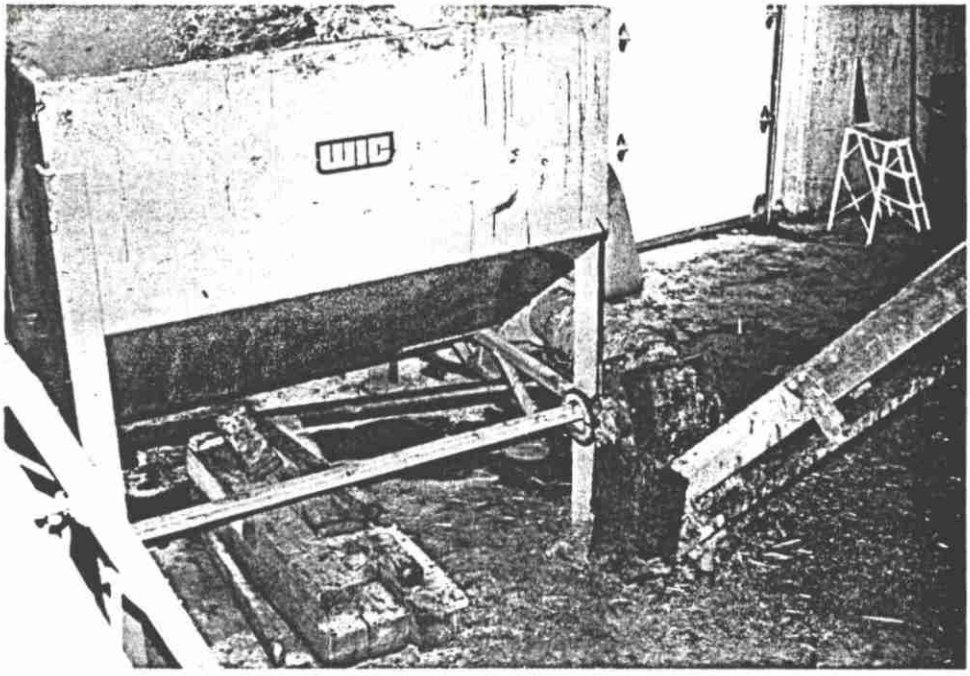
TEXEL inc. (1993). Communication personnelle.

# ANNEXE A

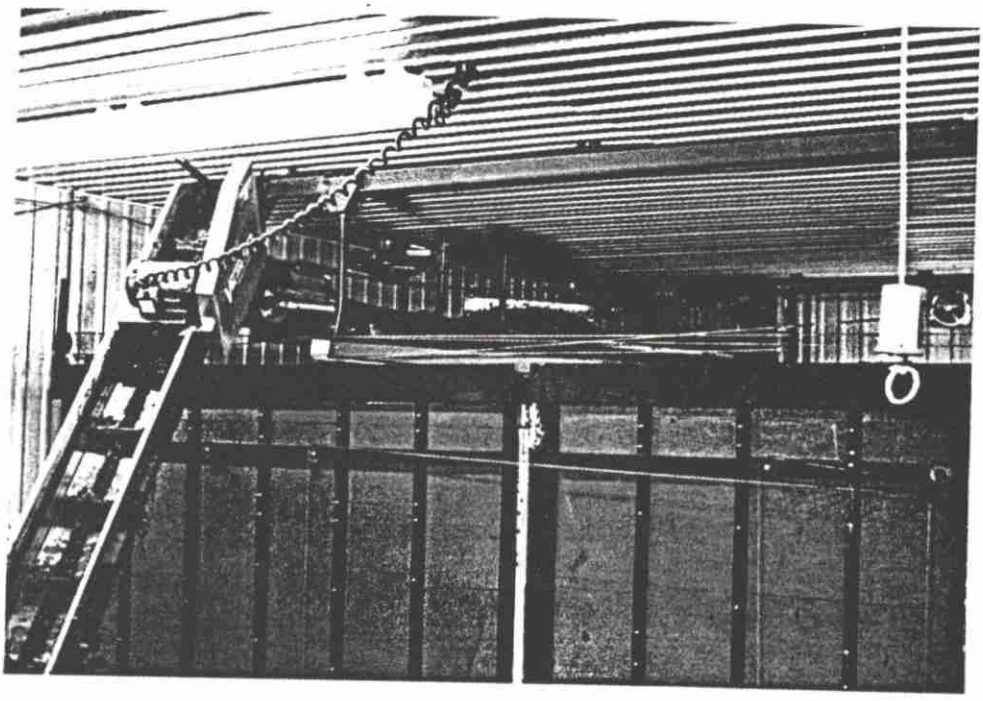
# PHOTOGRAPHIES DES ESSAIS



Réacteur à compost




Essoreuse à fumier



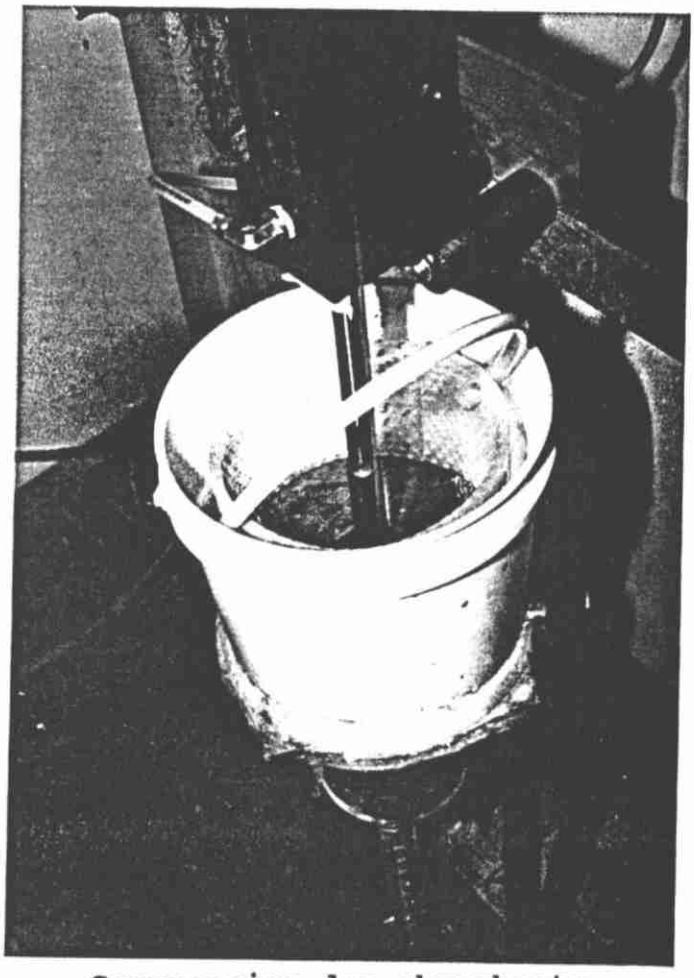
Système de convoyeurs pour l'alimentation des réacteurs



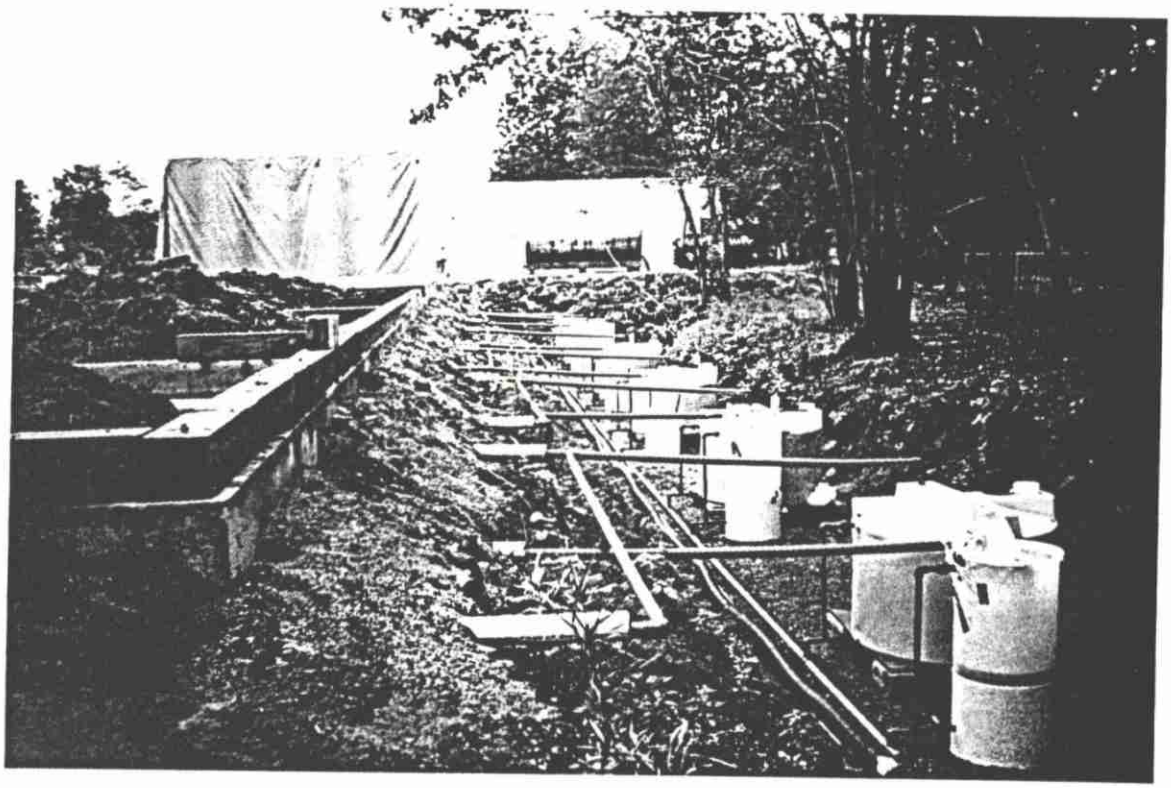
Système de vidange du réacteur à compost



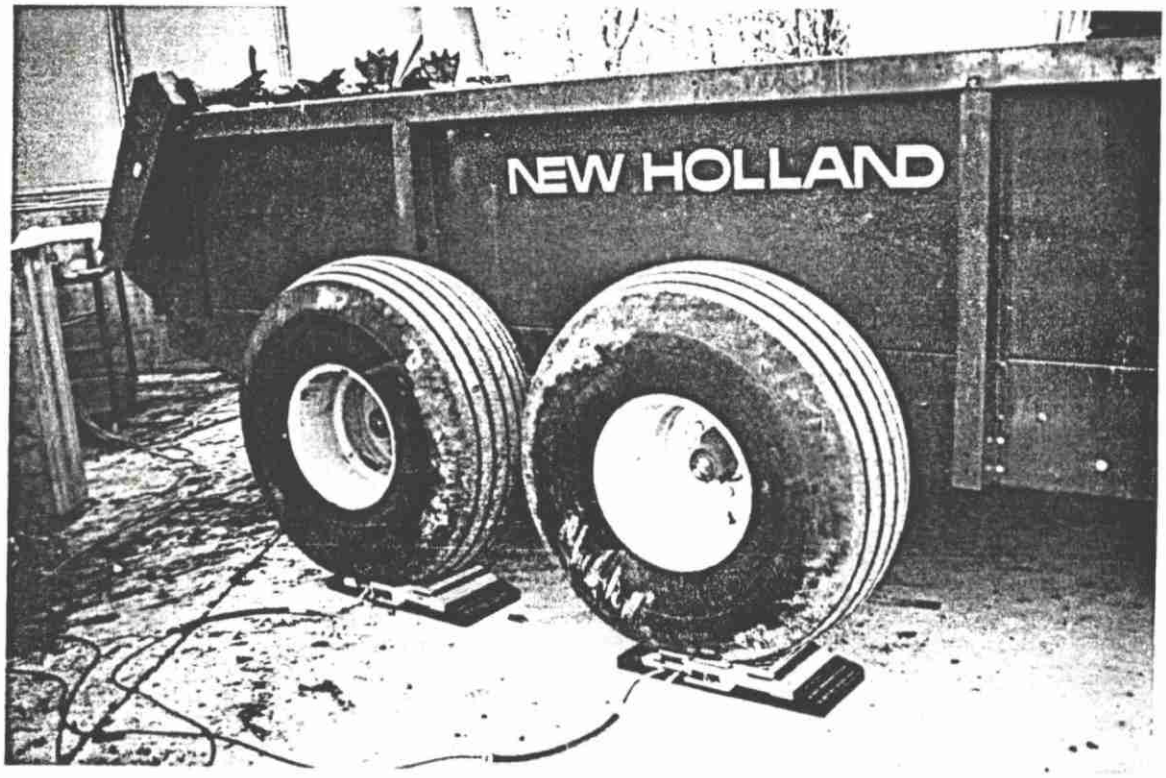
Imbibition des absorbants



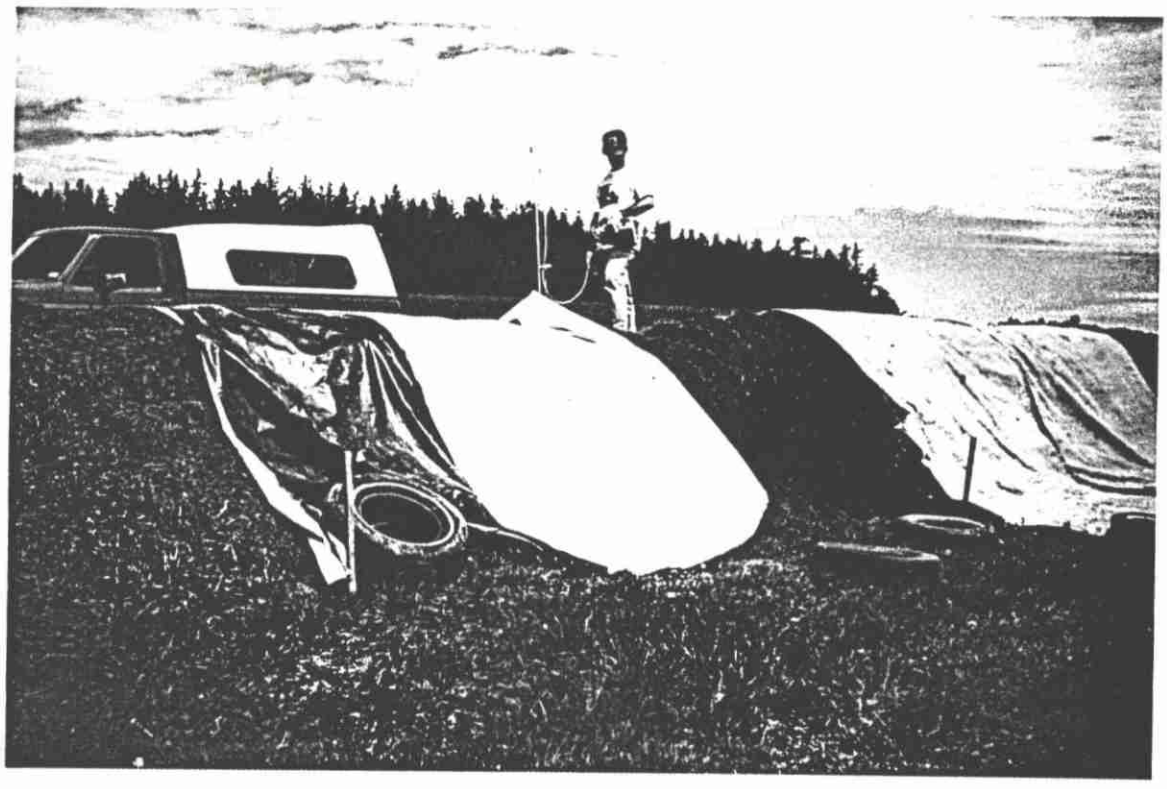
Compression des absorbants



Bassin de récolte des lixiviats sur le site de compostage du CRIQ



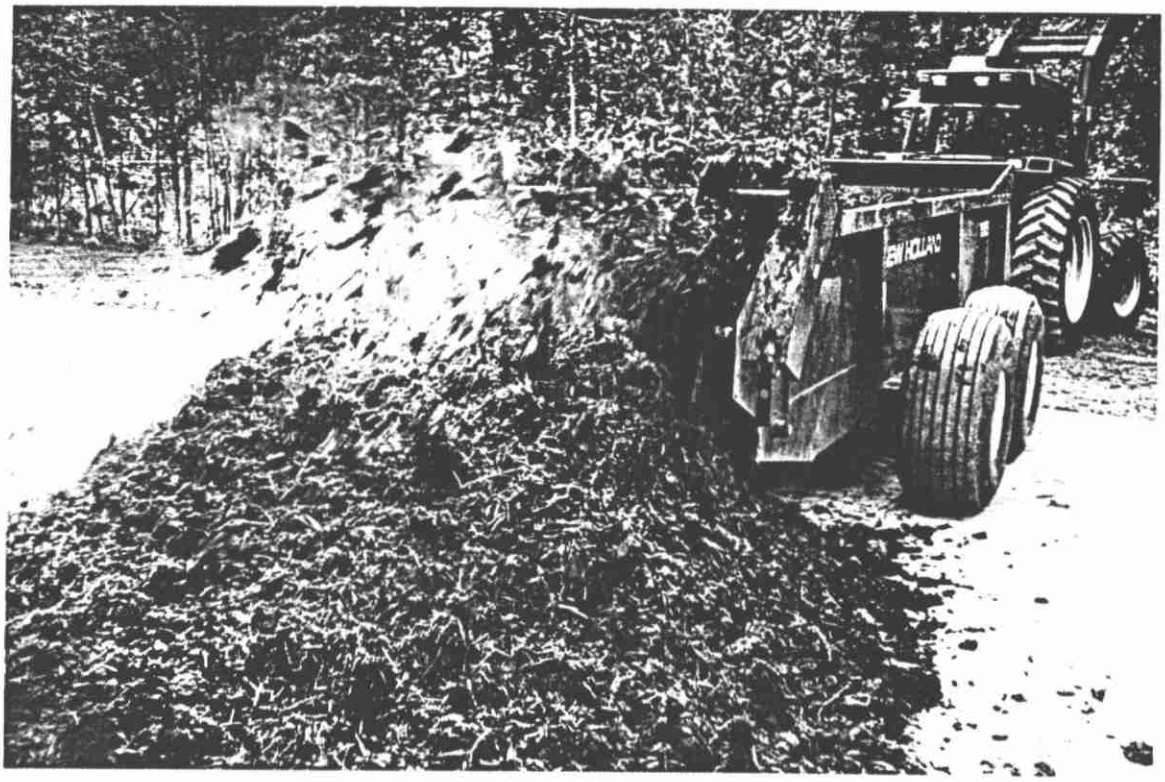

Pesée du compost au CRIQ



Essais de recouvrement du compost à la ferme E



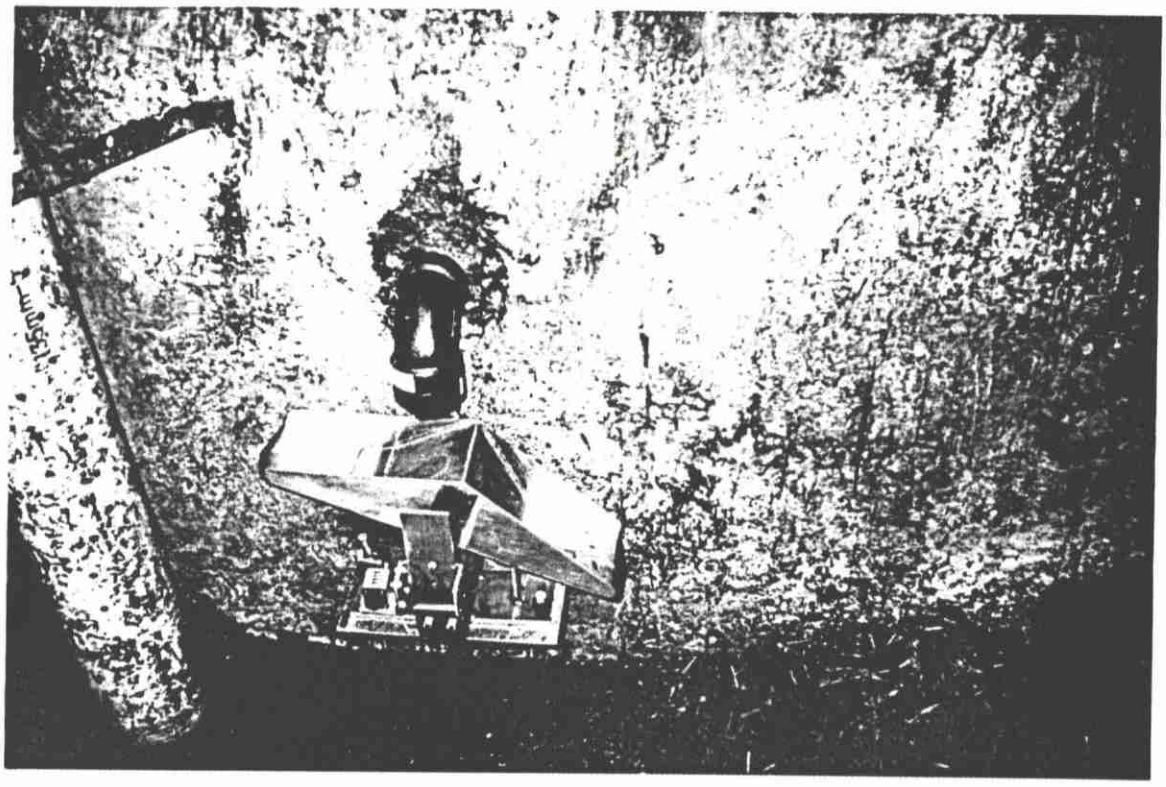
Retournement de l'andain A7 du CRIQ à l'aide du retourneur d'andain Sittler



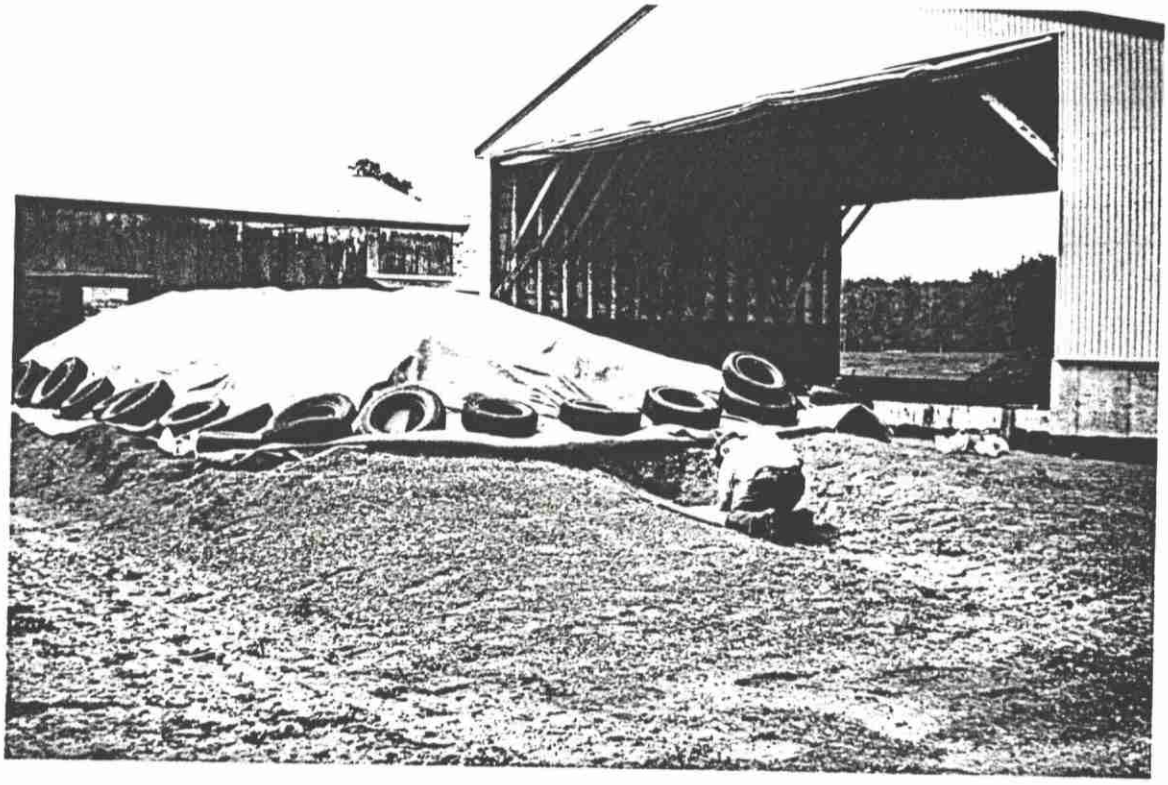
Retournement du compost sur une plate-forme de béton au CRIQ à l'aide de l'épandeur à fumier



Coupe de la pile de compost non-retourné à la fin des essais



Auget basculant pour la mesure du volume de lixiviat écoulé des plates-formes satellites à la ferme RA

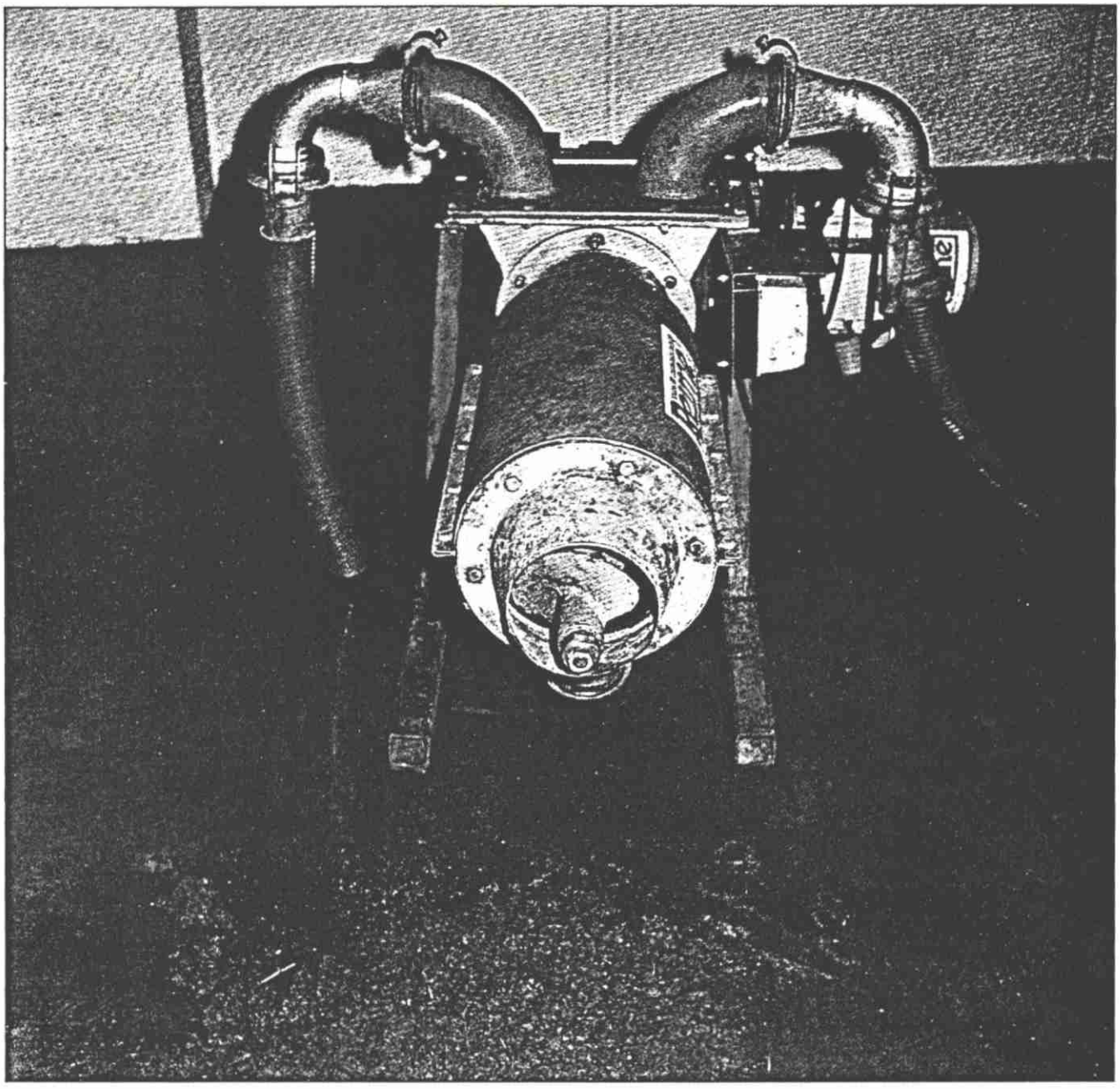


Andain de compost couvert d'un géotextile à la ferme RA

# ANNEXE B

# FICHE TECHNIQUE DE L'ESSOREUSE À FUMIER

# Manure Separator Reime



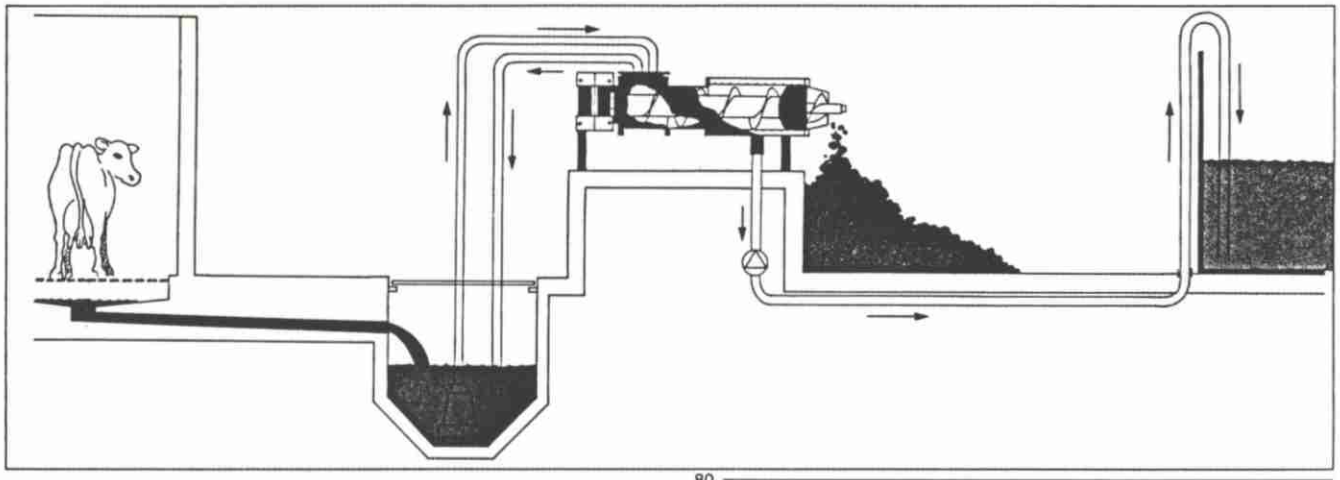
The Manure Separator carries out optimum separation of manure from cattle and pigs into a dry and a liquid fraction, based on the following characteristics:

- Simple, sturdy design
- The dry-matter content in the solid-matter fraction is up to 40%
- Simple, inexpensive installation
- Reasonable operating economy (3 kW motor)
- Few wearing parts
- Specially hardened screw
- Screen made of stainless steel

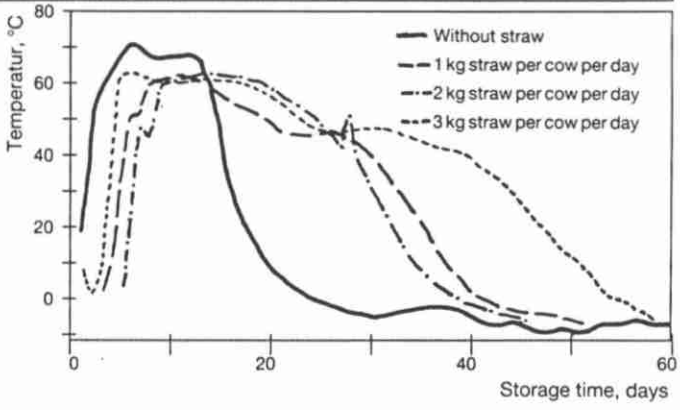
Reime

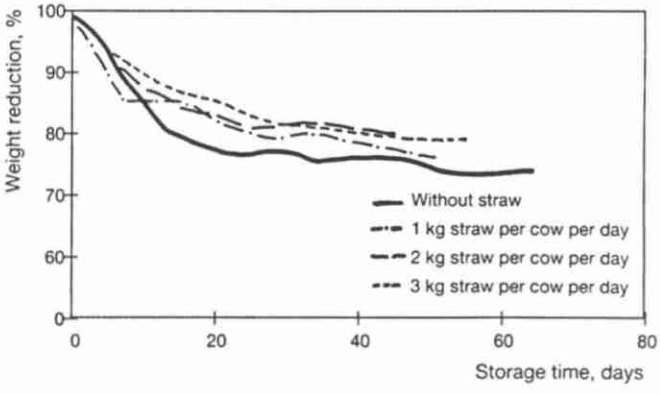
# Function

**A pump feeds well-agitated soft manure. A screw with 16 revolutions per minute carries the manure to the manure block - «the plug» - formed by solid-matter manure between the carrying screw and the feeding screw. When fresh manure approaches the block, the block will be pressed up against the filter wall, which is how the urine fraction is drained off.**



Manure separation experiments have demonstrated that it is possible to reduce the storage capacity by approx. 30% if the solid-matter content is removed. This fraction begins to compost immediately after, and the end-product is an excellent odourless soil-improvement product which can either be used as manure on one's farm or sold, e.g. to garden owners. The need for agitating the thin fraction before field use is minimized because of the low dry-matter content. This also enables spreading of the liquid fraction by means of a manure/-irrigation system without adding water. As an added benefit, disturbing odours are practically non-existent.




## Technical specifikations:

| **Capacity** | **Dry-matter content** |
|---|---|
| Cattle: 1,000-2,000 l/hour | Dry fraction: 30 - 35% |
| Pigs: 2,000-6,000 l/hour | Urine fraction: 2-4% |
| **Power input** | |
| Electrical motor 220/380 V 3-phase | |
| Material: Galvanized & stainless steel | |

Manufactured by:

Distributor:

4350 Nærbø, Norway
Tel.: +47 4 43 39 00
Fax: +47 4 43 44 34

# ANNEXE C

## CARACTÉRISTIQUES DES LIXIVIATS ÉCHANTILLONNÉS LORS DES ESSAIS AU CRIQ

| date | ORIGINE | | pH | CE mS/cm | TEE % B.H. | MES %p/p B.H. | NTK g/100g B.H. | N NH4 g/100g B.H. | N NO3 mg/kg B.H. | P tot mg/kg B.H. | K tot mg/kg B.H. | DBO5 mg O2/l | DCO mg O2/l | COLI T #/100 ml | COLI F #/100 ml |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 kg paille et ripe de pin, retourné, couvert | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29-May-92 | T1 | L1 | 7.41 | 28.6 | 94.82 | 1.390 | 0.383 | 0.254 | 3.6 | 424.0 | 6344 | 25120 | 59538 | 1.50E+08 | 9.30E+00 |
| 6-Jul-92 | T1 | L1 | 7.77 | 24.6 | 96.81 | 0.270 | 0.209 | 0.209 | 23.37 | 122.0 | 6265 | 19750 | 31905 | 4.00E+05 | 3.00E+00 |
| 4-Sep-92 | T1 | L1 | 9.32 | 3.51 | 99.50 | 0.010 | 0.016 | 0.004 | 1.00E-23 | 23.9 | 1204 | 178 | 4047 | 4.30E+03 | 3.00E+00 |
| 2.8 kg de paille haché, retourné, couvert, essoré | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20-Jul-92 | T2 | L4 | 8.07 | 18.44 | 97.97 | 0.090 | 0.149 | 0.121 | 1.00E-23 | 61.5 | 4777 | 8082 | 15732 | 2.40E+06 | 9.00E+00 |
| 9-Oct-92 | T2 | L4 | 9.08 | 28.1 | 95.47 | 0.070 | 0.245 | 0.129 | 1.00E-23 | 267.0 | 10059 | 826 | 39370 | | |
| 2 kg de paille, retourné, non-couvert | | | | | | | | | | | | | | | |
| pourtour | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15-Jun-92 | T3 | L5 | 7.74 | 7.09 | 98.87 | 0.305 | 0.065 | 0.033 | 1.5 | 85.9 | 1545 | 4835 | 11938 | 9.30E+04 | 9.00E+00 |
| 22-Jun-92 | T3 | L5 | 8.07 | 3.89 | 99.49 | 0.010 | 0.020 | 0.010 | 1.00E-23 | 24.5 | 1028 | 871 | 3914 | 2.30E+05 | 9.00E+00 |
| 6-Jul-92 | T3 | L5 | 8.53 | 3.98 | 99.45 | 0.010 | 0.020 | 0.005 | 6.37 | 34.0 | 1018 | 179 | 3810 | 2.40E+06 | 4.30E+00 |
| 20-Jul-92 | T3 | L5 | 8.21 | 4.08 | 99.30 | 0.010 | 0.028 | 0.007 | 5.5 | 47.5 | 1253 | 185 | 5520 | 4.30E+05 | 3.00E+00 |
| 4-Sep-92 | T3 | L5 | 8.57 | 1.47 | 99.78 | 0.010 | 0.008 | 0.002 | 1.00E-23 | 23.6 | 398 | 70 | 1651 | 4.60E+04 | 4.30E+00 |
| 13-Oct-92 | T3 | L5 | 8.55 | 1.63 | 99.76 | 0.000 | 0.007 | 0.002 | 12.41 | 24.6 | 479 | 15 | 1977 | 1.50E+04 | 3.00E+00 |
| centre | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29-May-92 | T3 | L6 | 6.59 | 26.3 | 94.08 | 1.720 | 0.468 | 0.316 | 12.4 | 546.0 | 5172 | 45064 | 82331 | 2.40E+08 | 2.40E+00 |
| 6-Jul-92 | T3 | L6 | 8.75 | 25.9 | 95.16 | 0.080 | 0.360 | 0.229 | 1.00E-23 | 144.0 | 6973 | 16854 | 47619 | 2.30E+04 | 3.00E+00 |
| 20-Jul-92 | T3 | L6 | 9.05 | 19.24 | 96.53 | 0.180 | 0.272 | 0.134 | 1.00E-23 | 133.0 | 5636 | 3405 | 28336 | 1.50E+06 | 9.00E+00 |
| 4-Sep-92 | T3 | L6 | 8.22 | 16.65 | 96.43 | 0.110 | 0.168 | 0.059 | 1.00E-23 | 137.0 | 5289 | 1986 | 33116 | 1.10E+05 | 4.00E+00 |
| 9-Oct-92 | T3 | L6 | 8.19 | 18.66 | 96.98 | 0.130 | 0.133 | 0.053 | 1.00E-23 | 207.0 | 6154 | | 24173 | | |
| 13-Oct-92 | T3 | L6 | 8.26 | 6.23 | 99.13 | 0.010 | 0.028 | 0.009 | 110.07 | 56.5 | 1862 | 94 | 6353 | 4.60E+04 | 3.00E+00 |
| 6 kg de paille, retourné, non-couvert | | | | | | | | | | | | | | | |
| pourtour | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15-Jun-92 | T4 | L7 | 8.24 | 2.72 | 99.63 | 0.069 | 0.014 | 0.004 | 20.52 | 29.7 | 619 | 493 | 2813 | 1.10E+05 | 1.10E+00 |
| 22-Jun-92 | T4 | L7 | 7.89 | 2.56 | 99.67 | 0.000 | 0.010 | 0.000 | 0.13 | 19.8 | 621 | 631 | 2367 | 2.40E+06 | 2.30E+00 |
| 6-Jul-92 | T4 | L7 | 8.46 | 3.18 | 99.57 | 0.000 | 0.020 | 0.004 | 21.07 | 21.5 | 714 | 86 | 3048 | 2.40E+05 | 2.30E+00 |
| 20-Jul-92 | T4 | L7 | 8.5 | 3.16 | 99.45 | 0.010 | 0.022 | 0.005 | 1.00E-23 | 33.4 | 877 | 47 | 4508 | 1.50E+06 | 4.00E+00 |
| 4-Sep-92 | T4 | L7 | 8.78 | 1.47 | 99.77 | 0.000 | 0.009 | 0.002 | 1.00E-23 | 19.3 | 383 | 59 | 1884 | 4.60E+04 | 4.30E+00 |
| 13-Oct-92 | T4 | L7 | 8.48 | 1.47 | 99.79 | 0.000 | 0.006 | 0.001 | 17.03 | 20.4 | 394 | 19 | 1600 | 2.40E+04 | 3.00E+00 |
| centre | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23-May-92 | T4 | L8 | 7.75 | 20 | 94.19 | 2.330 | 0.411 | 0.237 | 14.5 | 778.0 | 4594 | 34360 | 74423 | 4.60E+08 | 4.60E+00 |
| 6-Jul-92 | T4 | L8 | 8.92 | 17.1 | 97.06 | 0.030 | 0.200 | 0.098 | 39.07 | 68.4 | 4006 | 3154 | 26825 | 2.30E+05 | 4.00E+00 |
| 20-Jul-92 | T4 | L8 | 9.1 | 18.79 | 96.45 | 0.010 | 0.237 | 0.110 | 1.00E-23 | 99.8 | 5875 | 1056 | 30176 | 2.30E+06 | 3.00E+00 |
| 4-Sep-92 | T4 | L8 | 8.13 | 14.16 | 96.90 | 0.080 | 0.129 | 0.034 | 1.00E-23 | 155.0 | 4469 | 710 | 28651 | 1.10E+05 | 4.30E+00 |
| 9-Oct-92 | T4 | L8 | 9.1 | 14.33 | 97.74 | 0.020 | 0.085 | 0.022 | 41.8 | 62.0 | 4720 | | 17622 | | |
| 13-Oct-92 | T4 | L8 | 8.29 | 7.84 | 98.95 | 0.010 | 0.034 | 0.001 | 1.00E-23 | 66.4 | 2392 | 96 | 7530 | 4.60E+04 | 9.00E+00 |
| 6 kg de paille, non-retourné, non-couvert | | | | | | | | | | | | | | | |
| centre | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25-May-92 | T5 | L10 | 7.98 | 9.79 | 98.72 | 0.120 | 0.110 | 0.073 | 11.65 | 78.0 | 1725 | 8648 | 15939 | 4.60E+07 | 4.60E+00 |
| 6-Jul-92 | T5 | L10 | 8.79 | 14.5 | 98.19 | 0.040 | 0.128 | 0.079 | 92.59 | 49.4 | 3748 | 2382 | 14127 | 2.40E+06 | 1.10E+00 |
| 20-Jul-92 | T5 | L10 | 8.77 | 14.17 | 97.80 | 0.280 | 0.124 | 0.056 | 10.4 | 193.0 | 4203 | 1335 | 14904 | 4.60E+06 | 3.00E+00 |
| 4-Sep-92 | T5 | L10 | 9.08 | 14.82 | 97.91 | 0.030 | 0.050 | 0.009 | 1009 | 54.8 | 4660 | 267 | 12186 | 1.10E+05 | 9.00E+00 |
| 9-Oct-92 | T5 | L10 | 9.7 | 16.42 | 97.70 | 0.020 | 0.064 | 0.009 | 102.07 | 54.0 | 5447 | | 13606 | | |
| 13-Oct-92 | T5 | L10 | 8.52 | 9.07 | 98.88 | 0.010 | 0.038 | 0.011 | 538.39 | 50.0 | 2666 | 132 | 6902 | 1.10E+05 | 7.00E+00 |
| 14-Oct-92 | T5 | L10 | 8.14 | 11.07 | 90.80 | 7.460 | 0.317 | 0.085 | 124.16 | 37.2 | 4475 | | | 4.60E+06 | 9.00E+00 |
| pourtour | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25-May-92 | T5 | L9 | 7.87 | 23.5 | 95.80 | 0.740 | 0.365 | 0.245 | 3.27 | 324.0 | 4857 | 26050 | 53026 | 4.60E+07 | 4.60E+00 |
| 15-Jun-92 | T5 | L9 | 8 | 2.87 | 99.69 | 0.036 | 0.018 | 0.010 | 15.86 | 25.5 | 524 | 367 | 2297 | 1.50E+06 | 9.00E+00 |
| 22-Jun-92 | T5 | L9 | 8.19 | 2.12 | 99.76 | 0.000 | 0.010 | 0.000 | 12.7 | 16.9 | 464 | 295 | 1500 | 2.40E+06 | 2.30E+00 |
| 6-Jul-92 | T5 | L9 | 8.39 | 2.4 | 99.69 | 0.000 | 0.012 | 0.003 | 40.41 | 18.2 | 489 | 78 | 2071 | 2.40E+05 | 2.40E+00 |
| 20-Jul-92 | T5 | L9 | 8.38 | 2.4 | 99.68 | 0.010 | 0.012 | 0.004 | 55.5 | 28.2 | 606 | 92 | 2116 | 2.40E+05 | 4.00E+00 |
| 4-Sep-92 | T5 | L9 | 8.78 | 1.82 | 99.78 | 0.010 | 0.007 | 0.002 | 43.04 | 18.3 | 408 | 61 | 1535 | 1.10E+05 | 2.30E+00 |
| 13-Oct-92 | T5 | L9 | 8.17 | 1.49 | 99.86 | 0.000 | 0.005 | 0.001 | 47.43 | 19.5 | 374 | 22 | 894 | 1.10E+05 | 3.00E+00 |
| 4 kg de paille, retourné, non-couvert | | | | | | | | | | | | | | | |
| pourtour | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15-Jun-92 | T6 | L11 | 7.76 | 11.63 | 98.30 | 0.326 | 0.078 | 0.036 | 1.00E-23 | 139.0 | 3371 | 4992 | 15188 | 2.40E+05 | 2.80E+00 |
| 22-Jun-92 | T6 | L11 | 8.27 | 5.59 | 99.29 | 0.010 | 0.020 | 0.010 | 0.69 | 31.5 | 1630 | 1444 | 5344 | 4.00E+05 | 3.00E+00 |
| 6-Jul-92 | T6 | L11 | 8.61 | 4.04 | 99.50 | 0.000 | 0.016 | 0.005 | 15.25 | 27.5 | 1282 | 224 | 3238 | 2.40E+05 | 4.00E+00 |
| 20-Jul-92 | T6 | L11 | 8.41 | 3.92 | 99.49 | 0.010 | 0.016 | 0.005 | 1.7 | 39.8 | 1296 | 112 | 3542 | 2.40E+05 | 3.00E+00 |
| 4-Sep-92 | T6 | L11 | 9.07 | 2.2 | 99.69 | 0.010 | 0.009 | 0.002 | 1.00E-23 | 29.6 | 630 | 98 | 2419 | 4.60E+04 | 9.00E+00 |
| 13-Oct-92 | T6 | L11 | 8.66 | 1.14 | 99.87 | 0.000 | 0.004 | 0.001 | 22.6 | 18.0 | 354 | 12 | 926 | 1.50E+04 | 3.00E+00 |
| centre | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29-May-92 | T6 | L12 | 7.71 | 25.7 | 94.45 | 2.070 | 0.387 | 0.234 | 33.22 | 703.0 | 7508 | 23313 | 60004 | 2.40E+08 | 2.40E+00 |
| 6-Jul-92 | T6 | L12 | 8 | 27.2 | 96.69 | 0.350 | 0.260 | 0.208 | 2.3 | 140.0 | 7380 | 12703 | 31429 | 4.30E+06 | 3.00E+00 |
| 20-Jul-92 | T6 | L12 | 8.32 | 28.2 | 96.88 | 0.150 | 0.274 | 0.213 | 5.8 | 91.3 | 7914 | 3445 | 23552 | 1.50E+06 | 3.00E+00 |
| 4-Sep-92 | T6 | L12 | 8.8 | 13.46 | 97.62 | 0.060 | 0.074 | 0.019 | 1.00E-23 | 95.6 | 4896 | 590 | 19907 | 1.10E+05 | 4.00E+00 |
| 9-Oct-92 | T6 | L12 | 9.63 | 13.83 | 97.71 | 0.030 | 0.054 | 0.008 | 88.69 | 92.7 | 5174 | | 17480 | | |
| 13-Oct-92 | T6 | L12 | 8.63 | 10.18 | 98.44 | 0.030 | 0.034 | 0.006 | 122.75 | 115.0 | 3640 | 160 | 11012 | 4.60E+04 | 3.00E+00 |

VOLUME CUMULEE (Litre)

| | # jr | Pte (mm) | pf vide vol. (l) | T1 p1 centre | T2 p4 centre | T3 G5 pourtour | p6 centre | T4 G7 pourtour | p8 centre | T5 G9 pourtour | p10 centre | T6 G11 pourtour | p12 centre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 23-Mai | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 14.8 | 0.0 | 10.0 | 0.0 | 0.0 |
| 24-Mai | 1.0 | 7.6 | 267.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 14.8 | 0.0 | 10.0 | 0.0 | 0.0 |
| 25-Mai | 2.0 | 7.6 | 267.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 14.8 | 0.0 | 109.6 | 0.0 | 0.0 |
| 26-Mai | 3.0 | 7.6 | 267.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 43.9 | 0.0 | 132.8 | 0.0 | 0.0 |
| 27-Mai | 4.0 | 7.6 | 267.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 64.0 | 0.0 | 145.9 | 0.0 | 0.0 |
| 28-Mai | 5.0 | 7.6 | 267.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 42.3 | 0.0 | 76.2 | 0.0 | 154.3 | 0.0 | 0.0 |
| 29-Mai | 6.0 | 7.6 | 267.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 61.9 | 0.0 | 84.8 | 0.0 | 162.6 | 0.0 | 0.0 |
| 30-Mai | 7.0 | 7.6 | 267.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 61.9 | 0.0 | 84.8 | 0.0 | 162.6 | 0.0 | 0.0 |
| 31-Mai | 8.0 | 7.6 | 267.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 61.9 | 0.0 | 84.8 | 0.0 | 162.6 | 0.0 | 0.0 |
| 01-Jun | 9.0 | 20.2 | 710.3 | 11.9 | 0.0 | 250.7 | 105.3 | 213.5 | 107.4 | 263.6 | 183.4 | 278.2 | 31.5 |
| 01-Jun | 9.5 | 21.6 | 759.6 | 11.9 | 0.0 | 299.2 | 108.3 | 232.9 | 109.1 | 292.7 | 184.4 | 325.1 | 35.5 |
| 02-Jun | 10.0 | 21.6 | 759.6 | 14.3 | 0.0 | 302.4 | 121.6 | 236.1 | 114.5 | 292.7 | 189.0 | 333.2 | 45.6 |
| 02-Jun | 10.5 | 21.6 | 759.6 | 14.3 | 0.0 | 302.4 | 121.6 | 236.1 | 114.5 | 292.7 | 189.0 | 333.2 | 45.6 |
| 03-Jun | 11.0 | 21.8 | 766.6 | 16.3 | 0.0 | 321.8 | 131.6 | 236.1 | 118.0 | 294.3 | 192.4 | 344.5 | 58.0 |
| 04-Jun | 12.0 | 21.8 | 766.6 | 19.5 | 0.0 | 341.3 | 141.8 | 236.1 | 121.8 | 296.0 | 195.6 | 359.0 | 69.2 |
| 05-Jun | 13.0 | 21.8 | 766.6 | 22.4 | 0.0 | 359.0 | 147.2 | 236.1 | 125.1 | 296.0 | 197.8 | 372.0 | 80.6 |
| 08-Jun | 16.0 | 33.0 | 1160.4 | 33.8 | 0.0 | 572.5 | 167.3 | 404.3 | 137.0 | 520.8 | 208.0 | 570.9 | 123.3 |
| 09-Jun | 17.0 | 33.0 | 1160.4 | 36.6 | 0.0 | 588.7 | 171.7 | 407.6 | 139.6 | 520.8 | 209.8 | 570.9 | 139.6 |
| 10-Jun | 18.0 | 33.0 | 1160.4 | 40.4 | 0.0 | 616.2 | 175.7 | 418.9 | 141.3 | 540.2 | 211.4 | 593.5 | 152.9 |
| 11-Jun | 19.0 | 33.0 | 1160.4 | 43.8 | 0.0 | 630.7 | 178.5 | 422.1 | 142.6 | 540.2 | 212.9 | 608.1 | 159.2 |
| 12-Jun | 20.0 | 33.0 | 1160.4 | 47.3 | 0.0 | 648.5 | 180.7 | 422.1 | 143.7 | 540.2 | 214.1 | 608.1 | 162.7 |
| 13-Jun | 21.0 | 33.0 | 1160.4 | 47.3 | 0.0 | 648.5 | 180.7 | 422.1 | 143.7 | 540.2 | 214.1 | 608.1 | 162.7 |
| 14-Jun | 22.0 | 33.0 | 1160.4 | 47.3 | 0.0 | 648.5 | 180.7 | 422.1 | 143.7 | 540.2 | 214.1 | 608.1 | 162.7 |
| 15-Jun | 23.0 | 41.4 | 1455.8 | 62.5 | 0.0 | 786.0 | 192.6 | 532.1 | 148.0 | 685.7 | 218.8 | 744.0 | 175.3 |
| 16-Jun | 24.0 | 41.4 | 1455.8 | 67.2 | 0.0 | 798.9 | 193.4 | 532.1 | 148.7 | 685.7 | 219.7 | 744.0 | 177.0 |
| 17-Jun | 25.0 | 41.4 | 1455.8 | 78.9 | 0.0 | 824.8 | 194.1 | 532.1 | 148.9 | 685.7 | 220.3 | 744.0 | 179.1 |
| 18-Jun | 26.0 | 41.4 | 1455.8 | 116.6 | 0.0 | 824.8 | 195.1 | 532.1 | 149.9 | 685.7 | 221.1 | 744.0 | 193.9 |
| 19-Jun | 27.0 | 42.4 | 1491.0 | 149.3 | 0.0 | 824.8 | 200.5 | 532.1 | 151.1 | 685.7 | 222.1 | 753.7 | 225.9 |
| 20-Jun | 28.0 | 42.4 | 1491.0 | 149.3 | 0.0 | 824.8 | 200.5 | 532.1 | 151.1 | 685.7 | 222.1 | 753.7 | 225.9 |
| 21-Jun | 29.0 | 42.4 | 1491.0 | 149.3 | 0.0 | 824.8 | 200.5 | 532.1 | 151.1 | 685.7 | 222.1 | 753.7 | 225.9 |
| 22-Jun | 30.0 | 65.6 | 2306.8 | 179.7 | 0.0 | 1242.1 | 220.5 | 934.8 | 163.0 | 1216.2 | 234.1 | 1282.5 | 286.5 |
| 23-Jun | 31.0 | 65.6 | 2306.8 | 185.6 | 0.0 | 1256.6 | 226.4 | 938.0 | 164.2 | 1217.8 | 234.9 | 1298.7 | 299.7 |
| 24-Jun | 32.0 | 65.6 | 2306.8 | 185.6 | 0.0 | 1256.6 | 226.4 | 938.0 | 164.2 | 1217.8 | 234.9 | 1298.7 | 299.7 |
| 25-Jun | 33.0 | 65.8 | 2313.9 | 193.0 | 0.0 | 1261.5 | 238.1 | 938.0 | 166.5 | 1219.4 | 236.5 | 1314.9 | 316.1 |
| 26-Jun | 34.0 | 66.8 | 2349.0 | 198.2 | 0.0 | 1313.2 | 239.6 | 939.7 | 168.1 | 1225.9 | 237.3 | 1332.7 | 322.6 |
| 27-Jun | 35.0 | 66.8 | 2349.0 | 198.2 | 0.0 | 1313.2 | 239.6 | 939.7 | 168.1 | 1225.9 | 237.3 | 1332.7 | 322.6 |
| 28-Jun | 36.0 | 66.8 | 2349.0 | 198.2 | 0.0 | 1313.2 | 239.6 | 939.7 | 168.1 | 1225.9 | 237.3 | 1332.7 | 322.6 |
| 29-Jun | 37.0 | 73.5 | 2584.6 | 211.1 | 0.0 | 1386.0 | 241.7 | 1018.9 | 171.4 | 1342.4 | 239.3 | 1444.2 | 338.6 |
| 30-Jun | 38.0 | 91.1 | 3203.5 | 214.9 | 0.0 | 1712.7 | 243.4 | 1365.0 | 174.0 | 1764.5 | 243.3 | 1856.7 | 341.8 |
| 01-Jul | 39.0 | 91.1 | 3203.5 | 214.9 | 0.0 | 1712.7 | 243.4 | 1365.0 | 174.0 | 1764.5 | 243.3 | 1856.7 | 341.8 |
| 02-Jul | 40.0 | 91.1 | 3203.5 | 222.9 | 0.0 | 1719.2 | 245.3 | 1369.9 | 176.3 | 1764.5 | 245.5 | 1869.6 | 355.6 |
| 03-Jul | 41.0 | 91.1 | 3203.5 | 225.6 | 0.0 | 1722.4 | 245.6 | 1369.9 | 176.9 | 1764.5 | 246.0 | 1872.8 | 358.4 |
| 04-Jul | 42.0 | 91.1 | 3203.5 | 225.6 | 0.0 | 1722.4 | 245.6 | 1369.9 | 176.9 | 1764.5 | 246.0 | 1872.8 | 358.4 |
| 05-Jul | 43.0 | 91.1 | 3203.5 | 225.6 | 0.0 | 1722.4 | 245.6 | 1369.9 | 176.9 | 1764.5 | 246.0 | 1872.8 | 358.4 |
| 06-Jul | 44.0 | 142.7 | 5018.0 | 238.7 | 0.0 | 3040.5 | 276.9 | 2658.8 | 225.7 | 3111.7 | 288.3 | 3262.1 | 414.1 |
| 07-Jul | 45.0 | 144.3 | 5074.3 | 240.2 | 0.0 | 3061.5 | 279.4 | 2673.4 | 228.0 | 3131.1 | 289.4 | 3276.6 | 425.8 |
| 08-Jul | 46.0 | 144.3 | 5074.3 | 242.0 | 0.0 | 3085.8 | 280.7 | 2689.6 | 229.4 | 3137.6 | 290.3 | 3276.6 | 429.9 |
| 09-Jul | 47.0 | 182.6 | 6421.1 | 243.9 | 0.0 | 4057.8 | 315.1 | 3666.4 | 271.9 | 4174.3 | 326.4 | 4347.3 | 477.9 |
| 10-Jul | 48.0 | 200.6 | 7054.1 | 244.9 | 3.3 | 4636.8 | 356.9 | 4217.9 | 313.0 | 4780.7 | 355.5 | 4986.1 | 524.5 |
| 13-Jul | 51.0 | 218.5 | 7683.6 | 250.3 | 13.5 | 5008.8 | 373.8 | 4593.1 | 333.7 | 5254.6 | 369.1 | 5447.1 | 550.2 |
| 14-Jul | 52.0 | 218.5 | 7683.6 | 251.9 | 15.8 | 5021.7 | 380.3 | 4602.8 | 341.1 | 5261.1 | 372.2 | 5469.7 | 556.7 |
| 15-Jul | 53.0 | 218.5 | 7683.6 | 251.9 | 15.8 | 5021.7 | 380.3 | 4602.8 | 341.1 | 5261.1 | 372.2 | 5469.7 | 556.7 |
| 16-Jul | 54.0 | 218.5 | 7683.6 | 253.5 | 17.4 | 5029.8 | 381.4 | 4602.8 | 342.1 | 5262.7 | 373.1 | 5482.6 | 559.0 |
| 17-Jul | 55.0 | 218.9 | 7697.6 | 254.8 | 19.1 | 5050.8 | 382.2 | 4602.8 | 343.0 | 5264.3 | 373.7 | 5498.8 | 560.8 |
| 17-Jul | 55.4 | 234.9 | 8260.3 | 254.8 | 19.1 | 5408.3 | 382.2 | 4958.6 | 343.0 | 5710.7 | 373.7 | 5914.5 | 560.8 |
| 17-Jul | 55.7 | 243.9 | 8576.7 | 254.8 | 19.1 | 5616.9 | 382.2 | 5196.4 | 343.0 | 5971.1 | 373.7 | 6134.4 | 560.8 |
| 18-Jul | 56.0 | 274.3 | 9645.8 | 254.8 | 19.1 | 6385.1 | 473.7 | 5948.4 | 440.4 | 6614.8 | 431.5 | 6876.8 | 612.7 |
| 19-Jul | 57.0 | 274.3 | 9645.8 | 254.8 | 19.1 | 6385.1 | 473.7 | 5948.4 | 440.4 | 6614.8 | 431.5 | 6876.8 | 612.7 |
| 20-Jul | 58.0 | 275.3 | 9680.9 | 274.4 | 26.4 | 6415.8 | 481.8 | 5969.5 | 448.5 | 6724.7 | 435.5 | 6901.0 | 636.3 |
| 21-Jul | 59.0 | 281.6 | 9902.5 | 275.5 | 27.5 | 6516.1 | 484.0 | 6081.0 | 450.2 | 6854.1 | 436.9 | 7057.9 | 638.4 |
| 22-Jul | 60.0 | 281.6 | 9902.5 | 276.0 | 28.9 | 6524.2 | 485.5 | 6081.0 | 451.5 | 6854.1 | 437.7 | 7072.5 | 639.9 |
| 23-Jul | 61.0 | 281.6 | 9902.5 | 312.3 | 29.7 | 6525.8 | 489.0 | 6081.0 | 452.6 | 6855.7 | 438.2 | 7093.5 | 641.3 |
| 24-Jul | 62.0 | 281.6 | 9902.5 | 313.1 | 33.4 | 6525.8 | 499.0 | 6081.0 | 457.2 | 6855.7 | 438.5 | 7109.7 | 653.7 |
| 25-Jul | 63.0 | 281.6 | 9902.5 | 313.1 | 33.4 | 6525.8 | 499.0 | 6081.0 | 457.2 | 6855.7 | 438.5 | 7109.7 | 653.7 |
| 26-Jul | 64.0 | 281.6 | 9902.5 | 313.1 | 33.4 | 6525.8 | 499.0 | 6081.0 | 457.2 | 6855.7 | 438.5 | 7109.7 | 653.7 |
| 27-Jul | 65.0 | 327.1 | 11502.5 | 313.1 | 33.4 | 6525.8 | 499.0 | 6081.0 | 457.2 | 6855.7 | 438.5 | 7109.7 | 653.7 |
| 27-Jul | 65.1 | 342.5 | 12044.0 | 313.1 | 33.4 | 7864.9 | 499.0 | 7459.0 | 457.2 | 8211.0 | 438.5 | 8519.9 | 653.7 |
| 27-Jul | 65.2 | 342.5 | 12044.0 | 313.1 | 33.4 | 8096.2 | 499.0 | 7556.0 | 457.2 | 8340.4 | 438.5 | 8670.3 | 653.7 |
| 27-Jul | 65.3 | 342.5 | 12044.0 | 329.3 | 51.5 | 8096.2 | 613.4 | 7556.0 | 560.6 | 8340.4 | 496.3 | 8670.3 | 768.8 |

VOLUME CUMULEE (Litre)

| | # jr | Pte (mm) | pf vide vol. (l) | T1 p1 centre | p4 centre | T3 G5 pourtour | p6 centre | T4 G7 pourtour | p8 centre | T5 G9 pourtour | p10 centre | T6 G11 pourtour | p12 centre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 28-Jul | 66.0 | 343.1 | 12065.1 | 329.7 | 53.3 | 8096.2 | 627.2 | 7556.0 | 570.9 | 8340.4 | 499.0 | 8670.3 | 781.7 |
| 29-Jul | 67.0 | 343.3 | 12072.1 | 330.0 | 55.5 | 8096.2 | 632.8 | 7557.6 | 574.8 | 8340.4 | 500.6 | 8670.3 | 792.4 |
| 30-Jul | 68.0 | 343.5 | 12079.2 | 330.7 | 57.6 | 8102.7 | 636.5 | 7557.6 | 576.6 | 8350.1 | 501.6 | 8691.4 | 798.4 |
| 31-Jul | 69.0 | 343.5 | 12079.2 | 331.5 | 59.8 | 8104.3 | 638.6 | 7557.6 | 578.2 | 8350.1 | 502.1 | 8709.2 | 802.9 |
| 01-Aoû | 70.0 | 343.5 | 12079.2 | 331.5 | 59.8 | 8104.3 | 638.6 | 7557.6 | 578.2 | 8350.1 | 502.1 | 8709.2 | 802.9 |
| 02-Aoû | 71.0 | 343.5 | 12079.2 | 331.5 | 59.8 | 8104.3 | 638.6 | 7557.6 | 578.2 | 8350.1 | 502.1 | 8709.2 | 802.9 |
| 03-Aoû | 72.0 | 375.1 | 13190.4 | 337.4 | 65.2 | 8570.1 | 658.9 | 8291.9 | 594.7 | 9231.5 | 523.1 | 9506.5 | 834.0 |
| 04-Aoû | 73.0 | 375.1 | 13190.4 | 339.5 | 67.2 | 8573.3 | 661.5 | 8293.5 | 596.8 | 9236.4 | 525.0 | 9543.7 | 839.2 |
| 05-Aoû | 74.0 | 396.3 | 13935.9 | 343.9 | 69.0 | 9118.3 | 674.2 | 8814.3 | 611.1 | 9833.2 | 543.6 | 10117.8 | 854.9 |
| 06-Aoû | 75.0 | 396.3 | 13935.9 | 345.7 | 69.4 | 9118.3 | 681.7 | 8814.3 | 616.5 | 9838.0 | 547.6 | 10148.6 | 865.7 |
| 07-Aoû | 76.0 | 396.3 | 13935.9 | 347.4 | 72.6 | 9124.8 | 684.4 | 8814.3 | 618.2 | 9842.9 | 549.0 | 10172.8 | 870.5 |
| 08-Aoû | 77.0 | 396.3 | 13935.9 | 347.4 | 72.6 | 9124.8 | 684.4 | 8814.3 | 618.2 | 9842.9 | 549.0 | 10172.8 | 870.5 |
| 09-Aoû | 78.0 | 396.3 | 13935.9 | 347.4 | 72.6 | 9124.8 | 684.4 | 8814.3 | 618.2 | 9842.9 | 549.0 | 10172.8 | 870.5 |
| 10-Aoû | 79.0 | 396.5 | 13942.9 | 349.5 | 76.2 | 9128.0 | 687.8 | 8817.5 | 620.4 | 9851.0 | 551.3 | 10203.5 | 881.0 |
| 11-Aoû | 80.0 | 399.9 | 14062.5 | 350.7 | 79.9 | 9204.1 | 688.7 | 8875.7 | 621.3 | 9917.3 | 552.0 | 10292.5 | 882.5 |
| 12-Aoû | 81.0 | 399.9 | 14062.5 | 352.4 | 80.2 | 9228.3 | 689.2 | 8880.6 | 621.7 | 9922.1 | 552.4 | 10320.0 | 883.9 |
| 13-Aoû | 82.0 | 399.9 | 14062.5 | 364.6 | 82.2 | 9246.1 | 689.5 | 8882.2 | 622.2 | 9925.4 | 552.7 | 10341.0 | 885.8 |
| 14-Aoû | 83.0 | 399.9 | 14062.5 | 367.2 | 87.6 | 9270.4 | 689.7 | 8887.1 | 622.7 | 9925.4 | 553.1 | 10368.5 | 887.3 |
| 15-Aoû | 84.0 | 399.9 | 14062.5 | 367.2 | 87.6 | 9270.4 | 689.7 | 8887.1 | 622.7 | 9925.4 | 553.1 | 10368.5 | 887.3 |
| 16-Aoû | 85.0 | 399.9 | 14062.5 | 367.2 | 87.6 | 9270.4 | 689.7 | 8887.1 | 622.7 | 9925.4 | 553.1 | 10368.5 | 887.3 |
| 17-Aoû | 86.0 | 400.3 | 14076.5 | 367.8 | 94.5 | 9280.1 | 690.5 | 8891.9 | 623.7 | 9928.6 | 554.2 | 10400.9 | 891.3 |
| 18-Aoû | 87.0 | 400.4 | 14080.1 | 369.3 | 95.1 | 9288.2 | 690.8 | 8895.2 | 624.1 | 9930.2 | 554.5 | 10425.1 | 892.6 |
| 19-Aoû | 88.0 | 403.0 | 14171.5 | 370.9 | 95.4 | 9375.5 | 691.6 | 8959.8 | 624.4 | 10006.2 | 554.8 | 10523.8 | 893.7 |
| 20-Aoû | 89.0 | 405.6 | 14262.9 | 372.9 | 96.2 | 9435.3 | 692.2 | 9008.4 | 625.0 | 10040.2 | 555.3 | 10594.9 | 895.4 |
| 21-Aoû | 90.0 | 405.6 | 14262.9 | 373.2 | 99.1 | 9451.5 | 692.5 | 9016.4 | 625.2 | 10046.7 | 555.7 | 10622.4 | 896.8 |
| 22-Aoû | 91.0 | 405.6 | 14262.9 | 373.2 | 99.1 | 9451.5 | 692.5 | 9016.4 | 625.2 | 10046.7 | 555.7 | 10622.4 | 896.8 |
| 23-Aoû | 92.0 | 405.6 | 14262.9 | 373.2 | 99.1 | 9451.5 | 692.5 | 9016.4 | 625.2 | 10046.7 | 555.7 | 10622.4 | 896.8 |
| 24-Aoû | 93.0 | 405.6 | 14262.9 | 413.3 | 111.0 | 9461.2 | 693.2 | 9026.2 | 625.8 | 10058.0 | 556.5 | 10651.5 | 900.1 |
| 25-Aoû | 94.0 | 405.6 | 14262.9 | 414.3 | 113.3 | 9469.3 | 693.4 | 9026.2 | 625.8 | 10064.5 | 556.8 | 10682.3 | 900.8 |
| 26-Aoû | 95.0 | 405.6 | 14262.9 | 415.0 | 114.2 | 9491.9 | 693.6 | 9035.9 | 626.1 | 10074.2 | 557.2 | 10713.0 | 902.2 |
| 27-Aoû | 96.0 | 405.6 | 14262.9 | 415.3 | 115.9 | 9517.8 | 693.8 | 9043.9 | 626.4 | 10079.0 | 557.6 | 10740.5 | 903.2 |
| 28-Aoû | 97.0 | 418.4 | 14713.0 | 417.4 | 117.8 | 9833.2 | 695.8 | 9333.4 | 628.7 | 10396.0 | 559.1 | 11046.2 | 904.7 |
| 29-Aoû | 98.0 | 418.4 | 14713.0 | 417.4 | 117.8 | 9833.2 | 695.8 | 9333.4 | 628.7 | 10396.0 | 559.1 | 11046.2 | 904.7 |
| 30-Aoû | 99.0 | 418.4 | 14713.0 | 417.4 | 117.8 | 9833.2 | 695.8 | 9333.4 | 628.7 | 10396.0 | 559.1 | 11046.2 | 904.7 |
| 31-Aoû | 100.0 | 442.9 | 15574.6 | 422.0 | 140.5 | 10451.0 | 703.6 | 9902.7 | 636.1 | 11269.3 | 573.8 | 11853.2 | 915.2 |
| 01-Sep | 101.0 | 452.1 | 15898.1 | 423.6 | 141.0 | 10742.1 | 714.8 | 10161.5 | 644.1 | 11347.0 | 586.2 | 11940.5 | 927.1 |
| 02-Sep | 102.0 | 452.1 | 15898.1 | 424.0 | 141.8 | 10758.3 | 718.7 | 10164.7 | 651.7 | 11348.6 | 588.0 | 11964.8 | 953.8 |
| 03-Sep | 103.0 | 452.1 | 15898.1 | 424.0 | 141.8 | 10771.2 | 723.6 | 10164.7 | 657.3 | 11348.6 | 588.7 | 11985.8 | 970.0 |
| 04-Sep | 104.0 | 463.4 | 16295.5 | 426.1 | 145.4 | 11067.2 | 729.8 | 10442.9 | 663.8 | 11652.6 | 590.6 | 12286.6 | 980.3 |
| 05-Sep | 105.0 | 463.4 | 16295.5 | 426.1 | 145.4 | 11067.2 | 729.8 | 10442.9 | 663.8 | 11652.6 | 590.6 | 12286.6 | 980.3 |
| 06-Sep | 106.0 | 463.4 | 16295.5 | 426.1 | 145.4 | 11067.2 | 729.8 | 10442.9 | 663.8 | 11652.6 | 590.6 | 12286.6 | 980.3 |
| 07-Sep | 107.0 | 463.4 | 16295.5 | 426.1 | 145.4 | 11067.2 | 729.8 | 10442.9 | 663.8 | 11652.6 | 590.6 | 12286.6 | 980.3 |
| 08-Sep | 108.0 | 463.4 | 16295.5 | 429.6 | 159.5 | 11083.4 | 743.8 | 10446.1 | 678.3 | 11660.7 | 593.7 | 12312.5 | 1000.1 |
| 09-Sep | 109.0 | 464.7 | 16341.2 | 431.8 | 161.9 | 11115.7 | 745.4 | 10462.3 | 679.9 | 11681.8 | 594.2 | 12349.7 | 1002.5 |
| 10-Sep | 110.0 | 465.6 | 16372.8 | 433.3 | 164.2 | 11146.4 | 746.7 | 10475.3 | 681.0 | 11697.9 | 594.6 | 12383.7 | 1004.3 |
| 11-Sep | 111.0 | 488.3 | 17171.1 | 435.6 | 171.8 | 11822.5 | 774.4 | 11109.2 | 699.6 | 12374.0 | 610.8 | 13058.1 | 1021.0 |
| 12-Sep | 112.0 | 488.3 | 17171.1 | 435.6 | 171.8 | 11822.5 | 774.4 | 11109.2 | 699.6 | 12374.0 | 610.8 | 13058.1 | 1021.0 |
| 13-Sep | 113.0 | 488.3 | 17171.1 | 435.6 | 171.8 | 11822.5 | 774.4 | 11109.2 | 699.6 | 12374.0 | 610.8 | 13058.1 | 1021.0 |
| 14-Sep | 114.0 | 488.3 | 17171.1 | 438.5 | 178.3 | 11838.6 | 810.5 | 11110.9 | 723.3 | 12377.2 | 630.4 | 13077.5 | 1049.2 |
| 15-Sep | 115.0 | 488.3 | 17171.1 | 439.1 | 179.6 | 11856.4 | 811.2 | 11110.9 | 723.8 | 12377.2 | 630.9 | 13096.9 | 1050.3 |
| 16-Sep | 116.0 | 488.5 | 17178.1 | 439.7 | 180.7 | 11877.5 | 811.7 | 11110.9 | 724.3 | 12377.2 | 631.3 | 13114.7 | 1051.6 |
| 17-Sep | 117.0 | 497.5 | 17494.6 | 440.7 | 183.5 | 12102.3 | 812.6 | 11316.2 | 724.7 | 12585.8 | 632.1 | 13347.6 | 1052.5 |
| 18-Sep | 118.0 | 519.9 | 18282.3 | 444.6 | 190.0 | 12778.3 | 846.0 | 11955.1 | 744.8 | 13266.7 | 651.7 | 14025.2 | 1076.2 |
| 19-Sep | 119.0 | 519.9 | 18282.3 | 444.6 | 190.0 | 12778.3 | 846.0 | 11955.1 | 744.8 | 13266.7 | 651.7 | 14025.2 | 1076.2 |
| 20-Sep | 120.0 | 519.9 | 18282.3 | 444.6 | 190.0 | 12778.3 | 846.0 | 11955.1 | 744.8 | 13266.7 | 651.7 | 14025.2 | 1076.2 |
| 21-Sep | 121.0 | 525.8 | 18489.8 | 446.2 | 194.4 | 12964.3 | 862.5 | 12120.0 | 753.0 | 13436.5 | 659.1 | 14209.6 | 1092.8 |
| 22-Sep | 122.0 | 559.8 | 19685.4 | 449.4 | 207.1 | 14020.4 | 920.5 | 13126.0 | 787.9 | 14503.9 | 684.1 | 15243.1 | 1140.1 |
| 23-Sep | 123.0 | 562.6 | 19783.8 | 449.9 | 208.0 | 14140.1 | 936.0 | 13226.3 | 795.7 | 14617.2 | 692.1 | 15367.6 | 1155.4 |
| 24-Sep | 124.0 | 562.6 | 19783.8 | 450.1 | 208.9 | 14154.6 | 939.0 | 13226.3 | 798.5 | 14617.2 | 694.1 | 15383.8 | 1158.8 |
| 25-Sep | 125.0 | 562.6 | 19783.8 | 450.3 | 209.7 | 14167.5 | 940.6 | 13226.3 | 799.8 | 14617.2 | 695.2 | 15401.5 | 1160.6 |
| 26-Sep | 126.0 | 562.6 | 19783.8 | 450.3 | 209.7 | 14167.5 | 940.6 | 13226.3 | 799.8 | 14617.2 | 695.2 | 15401.5 | 1160.6 |
| 27-Sep | 127.0 | 562.6 | 19783.8 | 450.3 | 209.7 | 14167.5 | 940.6 | 13226.3 | 799.8 | 14617.2 | 695.2 | 15401.5 | 1160.6 |
| 28-Sep | 128.0 | 570.1 | 20047.6 | 452.0 | 212.6 | 14360.0 | 944.2 | 13391.2 | 802.2 | 14791.8 | 697.3 | 15587.5 | 1163.8 |
| 29-Sep | 129.0 | 570.1 | 20047.6 | 452.0 | 212.6 | 14360.0 | 944.2 | 13391.2 | 802.2 | 14791.8 | 697.3 | 15587.5 | 1163.8 |
| 30-Sep | 130.0 | 573.5 | 20167.1 | 452.9 | 213.8 | 14444.1 | 945.2 | 13457.6 | 803.2 | 14853.3 | 698.6 | 15673.3 | 1165.3 |
| 01-Oct | 131.0 | 573.5 | 20167.1 | 452.9 | 214.3 | 14458.7 | 945.6 | 13457.6 | 803.5 | 14853.3 | 699.0 | 15687.8 | 1165.9 |
| 02-Oct | 132.0 | 573.5 | 20167.1 | 452.9 | 214.3 | 14458.7 | 945.6 | 13457.6 | 803.5 | 14853.3 | 699.0 | 15687.8 | 1165.9 |
| 03-Oct | 133.0 | 578.0 | 20325.4 | 453.6 | 215.7 | 14571.9 | 946.5 | 13546.5 | 803.9 | 14932.5 | 699.4 | 15804.3 | 1166.4 |
| 04-Oct | 134.0 | 578.0 | 20325.4 | 453.6 | 215.7 | 14571.9 | 946.5 | 13546.5 | 803.9 | 14932.5 | 699.4 | 15804.3 | 1166.4 |
| 05-Oct | 135.0 | 578.0 | 20325.4 | 453.6 | 216.3 | 14589.7 | 946.8 | 13553.0 | 804.2 | 14945.5 | 699.8 | 15820.4 | 1166.9 |

VOLUME CUMULEE (Litre)

| | # jr | Pte (mm) | pf vide vol. (l) | T1 p1 centre | p4 centre | T3 G5 pourtour | p6 centre | T4 G7 pourtour | p8 centre | T5 G9 pourtour | p10 centre | T6 G11 pourtour | p12 centre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 06-Oct | 136.0 | 578.0 | 20325.4 | 453.6 | 216.6 | 14604.2 | 947.0 | 13553.0 | 804.2 | 14945.5 | 700.0 | 15838.2 | 1167.0 |
| 07-Oct | 137.0 | 578.0 | 20325.4 | 453.6 | 216.7 | 14618.8 | 947.1 | 13553.0 | 804.4 | 14945.5 | 700.1 | 15854.4 | 1167.1 |
| 08-Oct | 138.0 | 578.0 | 20325.4 | 453.6 | 217.0 | 14631.7 | 947.1 | 13553.0 | 804.4 | 14945.5 | 700.2 | 15872.2 | 1167.2 |
| 09-Oct | 139.0 | 578.0 | 20325.4 | 453.6 | 217.1 | 14644.7 | 947.2 | 13553.0 | 804.5 | 14945.5 | 700.3 | 15888.4 | 1167.2 |
| 10-Oct | 140.0 | 578.0 | 20325.4 | 453.6 | 217.1 | 14644.7 | 947.2 | 13553.0 | 804.5 | 14945.5 | 700.3 | 15888.4 | 1167.2 |
| 11-Oct | 141.0 | 578.0 | 20325.4 | 453.6 | 217.1 | 14644.7 | 947.2 | 13553.0 | 804.5 | 14945.5 | 700.3 | 15888.4 | 1167.2 |
| 12-Oct | 142.0 | 578.0 | 20325.4 | 453.6 | 217.1 | 14644.7 | 947.2 | 13553.0 | 804.5 | 14945.5 | 700.3 | 15888.4 | 1167.2 |
| 13-Oct | 143.0 | 611.5 | 21503.4 | 453.6 | 217.4 | 15687.8 | 995.4 | 14550.8 | 841.2 | 16014.5 | 727.5 | 16853.9 | 1199.2 |
| 14-Oct | 144.0 | **613.5** | **21573.7** | **453.6** | **217.8** | **15687.8** | **995.4** | **14591.3** | **841.7** | **16046.9** | **729.1** | **16853.9** | **1199.2** |

X: date d'échantillonnage D: Début des essais F: fin des essais M: mi temps entre deux échantillonnages

| Date | jrs | T1 Centre | #jrs | T2 Centre | #jrs | T3 Centre | #jrs | T3 Pourtour | #jrs | T4 Centre | #jrs | T4 Pourtour | #jrs | T5 Centre | #jrs | T5 Pourtour | #jrs | T6 Centre | #jrs | T6 Pourtour | #jrs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 23-05-92 | 0 | | | | | | | | | D-X | 21 | D-X | 10 | D | | D | | | | | |
| 24-05-92 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25-05-92 | 2 | | | | | | | | | | | | | X | 23 | X | 12 | | | | |
| 26-05-92 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27-05-92 | 4 | | | | | D | | D | | | | | | | | | | | | | |
| 28-05-92 | 5 | D | | | | | | | | | | | | | | | | D | | D | |
| 29-05-92 | 6 | X | 20 | | | X | 21 | | | | | | | | | | | X | 20 | | |
| 30-05-92 | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31-05-92 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01-06-92 | 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02-06-92 | 10 | | | | | | | | | | | M | | | | | | | | | |
| 03-06-92 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04-06-92 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | M | | | | | |
| 05-06-92 | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06-06-92 | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 07-06-92 | 15 | | | | | | | | | | | | | - | | | | | | | |
| 08-06-92 | 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09-06-92 | 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10-06-92 | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11-06-92 | 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12-06-92 | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13-06-92 | 21 | | | | | | | | | M | | | | | | | | | | | |
| 14-06-92 | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15-06-92 | 23 | | | | | | | X | 22 | | | X | 16 | M | | X | 14 | | | X | 21 |
| 16-06-92 | 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17-06-92 | 25 | M | | | | M | | | | | | | | | | | | M | | | |
| 18-06-92 | 26 | | | | | | | M | | | | M | | | | M | | | | M | |
| 19-06-92 | 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20-06-92 | 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21-06-92 | 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22-06-92 | 30 | | | | | | | X | 11 | | | X | 11 | | | X | 11 | | | X | 11 |
| 23-06-92 | 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24-06-92 | 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25-06-92 | 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26-06-92 | 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27-06-92 | 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28-06-92 | 36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29-06-92 | 37 | | | | | | | M | | | | M | | | | M | | | | M | |
| 30-06-92 | 38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01-07-92 | 39 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02-07-92 | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03-07-92 | 41 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04-07-92 | 42 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05-07-92 | 43 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06-07-92 | 44 | X | 49 | | | X | 26 | X | 14 | X | 30 | X | 14 | X | 28 | X | 14 | X | 26 | X | 14 |
| 07-07-92 | 45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 08-07-92 | 46 | | | D | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09-07-92 | 47 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10-07-92 | 48 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11-07-92 | 49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12-07-92 | 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13-07-92 | 51 | | | | | M | | M | | M | | M | | M | | M | | M | | M | |
| 14-07-92 | 52 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15-07-92 | 53 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16-07-92 | 54 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17-07-92 | 55 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18-07-92 | 56 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19-07-92 | 57 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20-07-92 | 58 | | | X | 52 | X | 30 | X | 30 | X | 30 | X | 30 | X | 30 | X | 30 | X | 30 | X | 30 |
| 21-07-92 | 59 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22-07-92 | 60 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23-07-92 | 61 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24-07-92 | 62 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25-07-92 | 63 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26-07-92 | 64 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27-07-92 | 65 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28-07-92 | 66 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29-07-92 | 67 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30-07-92 | 68 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31-07-92 | 69 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01-08-92 | 70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02-08-92 | 71 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03-08-92 | 72 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04-08-92 | 73 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05-08-92 | 74 | M | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06-08-92 | 75 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 07-08-92 | 76 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 08-08-92 | 77 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09-08-92 | 78 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10-08-92 | 79 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11-08-92 | 80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12-08-92 | 81 | | | | | M | | M | | M | | M | | M | | M | | M | | M | |
| 13-08-92 | 82 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14-08-92 | 83 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15-08-92 | 84 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

X: date d'échantillonnage D: Début des essais F: fin des essais M: mi temps entre deux échantillonnages

| Date | jrs | T1 Centre | #jrs | T2 Centre | #jrs | T3 Centre | #jrs | T3 Pourtour | #jrs | T4 Centre | #jrs | T4 Pourtour | #jrs | T5 Centre | #jrs | T5 Pourtour | #jrs | T6 Centre | #jrs | T6 Pourtour | #jrs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16-08-92 | 85 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17-08-92 | 86 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18-08-92 | 87 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19-08-92 | 88 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20-08-92 | 89 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21-08-92 | 90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22-08-92 | 91 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23-08-92 | 92 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24-08-92 | 93 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25-08-92 | 94 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26-08-92 | 95 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27-08-92 | 96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28-08-92 | 97 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29-08-92 | 98 | | | M | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30-08-92 | 99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31-08-92 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01-09-92 | 101 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02-09-92 | 102 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03-09-92 | 103 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04-09-92 | 104 | X | 69 | | X | | 40 | X | | 42 | X | 30 | X | 42 | X | 40 | X | 42 | X | 40 | X 42 |
| 05-09-92 | 105 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06-09-92 | 106 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 07-09-92 | 107 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 08-09-92 | 108 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09-09-92 | 109 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10-09-92 | 110 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11-09-92 | 111 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12-09-92 | 112 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13-09-92 | 113 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14-09-92 | 114 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15-09-92 | 115 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16-09-92 | 116 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17-09-92 | 117 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18-09-92 | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19-09-92 | 119 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20-09-92 | 120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21-09-92 | 121 | | | | | M | | | | M | | | | M | | | | M | | | |
| 22-09-92 | 122 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23-09-92 | 123 | | | | | | | M | | | | M | | | | M | | | | M | |
| 24-09-92 | 124 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25-09-92 | 125 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26-09-92 | 126 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27-09-92 | 127 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28-09-92 | 128 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29-09-92 | 129 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30-09-92 | 130 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01-10-92 | 131 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02-10-92 | 132 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03-10-92 | 133 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04-10-92 | 134 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05-10-92 | 135 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06-10-92 | 136 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 07-10-92 | 137 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 08-10-92 | 138 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09-10-92 | 139 | | | X | | 45 | X | 20 | | X | | 30 | | X | | 20 | | X | | 20 | |
| 10-10-92 | 140 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11-10-92 | 141 | | | | | M | | | | M | | | | M | | | | M | | | |
| 12-10-92 | 142 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13-10-92 | 143 | F | | F | | X | | 3 | X | 21 | X | 3 | X | 21 | X | 3 | X | 21 | F-X | 2 | F-X 20 |
| 14-10-92 | 144 | | | | | F | | F | | F | | F | | X | | F | | | | | |
| totale | | | 138 | | 97 | | 140 | | 140 | | 144 | | 144 | | 144 | | 144 | | 138 | | 138 |

| Durée | Volume (Litre) | DATE..... | ORIGINE | NTK g/100g b.h. | charge ponctuelle | charge cummulée | P tot mg/kg B.H. | charge ponctuelle | charge cummulée | K tot mg/kg B.H. | charge ponctuelle | charge cummulée |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | | | | 0.00 | 0.00 | | 0.000 | 0.000 | | 0.00 | 0.00 |
| 20 | 78.9 | 29-May-92 | T1 centre | 0.383 | 0.30 | 0.30 | 424 | 0.033 | 0.033 | 6344 | 0.50 | 0.50 |
| 69 | 265 | 6-Jul-92 | T1 centre | 0.209 | 0.55 | 0.86 | 122 | 0.032 | 0.066 | 6265 | 1.66 | 2.16 |
| 138 | 109.7 | 4-Sep-92 | T1 centre | 0.016 | 0.02 | 0.87 | 23.9 | 0.003 | 0.068 | 1204 | 0.13 | 2.29 |
| | 453.6 | | | | 0.87 | | | 0.068 | | | 2.29 | |
| 0 | | | | | 0.00 | 0.00 | | 0.000 | 0.000 | | 0.00 | 0.00 |
| 52 | 117.8 | 20-Jul-92 | T2 centre | 0.149 | 0.18 | 0.18 | 61.5 | 0.007 | 0.007 | 4777 | 0.56 | 0.56 |
| 97 | 100 | 9-Oct-92 | T2 centre | 0.245 | 0.25 | 0.42 | 267 | 0.027 | 0.034 | 10059 | 1.01 | 1.57 |
| | 217.8 | | | | 0.42 | | | 0.034 | | | 1.57 | |
| 0 | | | | | | 0 | | - | 0 | | | 0 |
| 22 | 824.8 | 15-Jun-92 | T3 pourtour | 0.065 | 0.54 | 0.54 | 85.9 | 0.07 | 0.07 | 1545 | 1.27 | 1.27 |
| 33 | 561.2 | 22-Jun-92 | T3 pourtour | 0.02 | 0.11 | 0.65 | 24.5 | 0.01 | 0.08 | 1028 | 0.58 | 1.85 |
| 47 | 3622.8 | 6-Jul-92 | T3 pourtour | 0.02 | 0.72 | 1.37 | 34 | 0.12 | 0.21 | 1018 | 3.69 | 5.54 |
| 77 | 4219.5 | 20-Jul-92 | T3 pourtour | 0.028 | 1.18 | 2.55 | 47.5 | 0.20 | 0.41 | 1253 | 5.29 | 10.83 |
| 119 | 4911.8 | 4-Sep-92 | T3 pourtour | 0.008 | 0.39 | 2.95 | 23.6 | 0.12 | 0.52 | 398 | 1.95 | 12.78 |
| 140 | 1547.7 | 13-Oct-92 | T3 pourtour | 0.007 | 0.11 | 3.06 | 24.6 | 0.04 | 0.56 | 479 | 0.74 | 13.52 |
| | 15687.8 | | | | 3.06 | | | 0.56 | | | 13.52 | |
| 0 | | | | | | 0 | | | 0 | | | 0 |
| 21 | 195.1 | 29-May-92 | T3 centre | 0.468 | 0.91 | 0.91 | 546 | 0.11 | 0.11 | 5172 | 1.01 | 1.01 |
| 47 | 179.1 | 6-Jul-92 | T3 centre | 0.36 | 0.64 | 1.56 | 144 | 0.03 | 0.13 | 6973 | 1.25 | 2.26 |
| 77 | 315.2 | 20-Jul-92 | T3 centre | 0.272 | 0.86 | 2.42 | 133 | 0.04 | 0.17 | 5636 | 1.78 | 4.03 |
| 117 | 173.3 | 4-Sep-92 | T3 centre | 0.168 | 0.29 | 2.71 | 137 | 0.02 | 0.20 | 5289 | 0.92 | 4.95 |
| 137 | 84.7 | 9-Oct-92 | T3 centre | 0.133 | 0.11 | 2.82 | 207 | 0.02 | 0.22 | 6154 | 0.52 | 5.47 |
| 140 | 48 | 13-Oct-92 | T3 centre | 0.028 | 0.01 | 2.83 | 56.5 | 0.00 | 0.22 | 1862 | 0.09 | 5.56 |
| | 995.40 | | | | 2.83 | | | 0.22 | | | 5.56 | |
| 0 | | | | | | 0 | | | 0 | | | 0 |
| 25 | 532.1 | 15-Jun-92 | T4 pourtour | 0.014 | 0.07 | 0.07 | 29.7 | 0.02 | 0.02 | 619 | 0.33 | 0.33 |
| 37 | 486.8 | 22-Jun-92 | T4 pourtour | 0.01 | 0.05 | 0.12 | 19.8 | 0.01 | 0.03 | 621 | 0.30 | 0.63 |
| 51 | 3574.2 | 6-Jul-92 | T4 pourtour | 0.02 | 0.71 | 0.84 | 21.5 | 0.08 | 0.10 | 714 | 2.55 | 3.18 |
| 81 | 4287.5 | 20-Jul-92 | T4 pourtour | 0.022 | 0.94 | 1.78 | 33.4 | 0.14 | 0.25 | 877 | 3.76 | 6.94 |
| 123 | 4345.7 | 4-Sep-92 | T4 pourtour | 0.009 | 0.39 | 2.17 | 19.3 | 0.08 | 0.33 | 383 | 1.66 | 8.61 |
| 144 | 1365 | 13-Oct-92 | T4 pourtour | 0.006 | 0.08 | 2.25 | 20.4 | 0.03 | 0.36 | 394 | 0.54 | 9.15 |
| | 14591.30 | | | | 2.25 | | | 0.36 | | | 9.15 | |
| 0 | | | | | | 0 | | | 0 | | | 0 |
| 21 | 143.7 | 23-May-92 | T4 centre | 0.411 | 0.59 | 0.59 | 778 | 0.11 | 0.11 | 4594 | 0.66 | 0.66 |
| 51 | 190 | 6-Jul-92 | T4 centre | 0.2 | 0.38 | 0.97 | 68.4 | 0.01 | 0.12 | 4006 | 0.76 | 1.42 |
| 81 | 288 | 20-Jul-92 | T4 centre | 0.237 | 0.68 | 1.65 | 99.8 | 0.03 | 0.15 | 5875 | 1.69 | 3.11 |
| 121 | 131.3 | 4-Sep-92 | T4 centre | 0.129 | 0.17 | 1.82 | 155 | 0.02 | 0.17 | 4469 | 0.59 | 3.70 |
| 141 | 51.5 | 9-Oct-92 | T4 centre | 0.085 | 0.04 | 1.87 | 62 | 0.00 | 0.18 | 4720 | 0.24 | 3.94 |
| 144 | 37.2 | 13-Oct-92 | T4 centre | 0.034 | 0.01 | 1.88 | 66.4 | 0.00 | 0.18 | 2392 | 0.09 | 4.03 |
| | 841.7 | | | | 1.878967 | | | 0.179552 | | | 4.03214 | |

| Durée | Volume (Litre) | DATE..... | ORIGINE | NTK g/100g b.h. | charge ponctuelle | cummulée | P tot mg/kg B.H. | charge ponctuelle | cummulée | K tot mg/kg B.H. | charge ponctuelle | cummulée |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | | | | | 0 | | | 0 | | | 0 |
| 23 | 218.8 | 25-May-92 | T5 centre | 0.11 | 0.24 | 0.24 | 78 | 0.02 | 0.017 | 1725 | 0.38 | 0.38 |
| 51 | 150.3 | 6-Jul-92 | T5 centre | 0.128 | 0.19 | 0.43 | 49.4 | 0.01 | 0.024 | 3748 | 0.56 | 0.94 |
| 81 | 183.3 | 20-Jul-92 | T5 centre | 0.124 | 0.23 | 0.66 | 193 | 0.04 | 0.060 | 4203 | 0.77 | 1.71 |
| 121 | 139.7 | 4-Sep-92 | T5 centre | 0.05 | 0.07 | 0.73 | 54.8 | 0.01 | 0.068 | 4660 | 0.65 | 2.36 |
| 141 | 106.7 | 9-Oct-92 | T5 centre | 0.064 | 0.07 | 0.80 | 54 | 0.01 | 0.073 | 5447 | 0.58 | 2.94 |
| 143 | 41.2 | 13-Oct-92 | T5 centre | 0.038 | 0.02 | 0.81 | 50 | 0.00 | 0.075 | 2666 | 0.11 | 3.05 |
| 144 | 28.8 | 14-Oct-92 | T5 centre | 0.317 | 0.09 | 0.91 | 37.2 | 0.00 | 0.076 | 4475 | 0.13 | 3.18 |
| | 868.8 | | | | 0.905446 | | | 0.076417 | | | 3.18208 | |
| 0 | | | | | | 0 | | | 0 | | | 0 |
| 12 | 296 | 25-May-92 | T5 pourtour | 0.365 | 1.08 | 1.08 | 324 | 0.10 | 0.096 | 4857 | 1.44 | 1.44 |
| 26 | 389.7 | 15-Jun-92 | T5 pourtour | 0.018 | 0.07 | 1.15 | 25.5 | 0.01 | 0.106 | 524 | 0.20 | 1.64 |
| 37 | 656.7 | 22-Jun-92 | T5 pourtour | 0.01 | 0.07 | 1.22 | 16.9 | 0.01 | 0.117 | 464 | 0.30 | 1.95 |
| 51 | 3912.2 | 6-Jul-92 | T5 pourtour | 0.012 | 0.47 | 1.69 | 18.2 | 0.07 | 0.188 | 489 | 1.91 | 3.86 |
| 81 | 4667.5 | 20-Jul-92 | T5 pourtour | 0.012 | 0.56 | 2.25 | 28.2 | 0.13 | 0.320 | 606 | 2.83 | 6.69 |
| 123 | 4695.1 | 4-Sep-92 | T5 pourtour | 0.007 | 0.33 | 2.57 | 18.3 | 0.09 | 0.406 | 408 | 1.92 | 8.60 |
| 144 | 1429.7 | 13-Oct-92 | T5 pourtour | 0.005 | 0.07 | 2.65 | 19.5 | 0.03 | 0.434 | 374 | 0.53 | 9.14 |
| | 16046.9 | | | | 2.645922 | | | 0.433565 | | | 9.138463 | |
| 0 | | | | | | 0 | | | 0 | | | 0 |
| 21 | 744 | 15-Jun-92 | T6 pourtour | 0.078 | 0.58 | 0.58 | 139 | 0.10 | 0.103 | 3371 | 2.51 | 2.51 |
| 32 | 700.2 | 22-Jun-92 | T6 pourtour | 0.02 | 0.14 | 0.72 | 31.5 | 0.02 | 0.125 | 1630 | 1.14 | 3.65 |
| 46 | 4002.9 | 6-Jul-92 | T6 pourtour | 0.016 | 0.64 | 1.36 | 27.5 | 0.11 | 0.236 | 1282 | 5.13 | 8.78 |
| 76 | 4872.9 | 20-Jul-92 | T6 pourtour | 0.016 | 0.78 | 2.14 | 39.8 | 0.19 | 0.429 | 1296 | 6.32 | 15.10 |
| 118 | 5047.6 | 4-Sep-92 | T6 pourtour | 0.009 | 0.45 | 2.59 | 29.6 | 0.15 | 0.579 | 630 | 3.18 | 18.28 |
| 138 | 1486.3 | 13-Oct-92 | T6 pourtour | 0.004 | 0.06 | 2.65 | 18 | 0.03 | 0.606 | 354 | 0.53 | 18.80 |
| | 16853.9 | | | | 2.654224 | | | 0.605656 | | | 18.80248 | |
| 0 | | | | | | 0 | | | 0 | | | 0 |
| 20 | 179 | 29-May-92 | T6 centre | 0.387 | 0.69 | 0.69 | 703 | 0.13 | 0.126 | 7508 | 1.34 | 1.34 |
| 46 | 371.1 | 6-Jul-92 | T6 centre | 0.26 | 0.96 | 1.66 | 140 | 0.05 | 0.178 | 7380 | 2.74 | 4.08 |
| 76 | 333.7 | 20-Jul-92 | T6 centre | 0.274 | 0.91 | 2.57 | 91.3 | 0.03 | 0.208 | 7914 | 2.64 | 6.72 |
| 116 | 208.9 | 4-Sep-92 | T6 centre | 0.074 | 0.15 | 2.73 | 95.6 | 0.02 | 0.228 | 4896 | 1.02 | 7.75 |
| 136 | 74.4 | 9-Oct-92 | T6 centre | 0.054 | 0.04 | 2.77 | 92.7 | 0.01 | 0.235 | 5174 | 0.38 | 8.13 |
| 138 | 32 | 13-Oct-92 | T6 centre | 0.034 | 0.01 | 2.78 | 115 | 0.00 | 0.239 | 3640 | 0.12 | 8.25 |
| | 1199.1 | | | | 2.77757 | | | 0.238806 | | | 8.247752 | |

| | azote | | | phos. | | | pot | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | T3L5 | T3L6 | TOT | T3L5 | T3L6 | TOT | T3L5 | T3L6 | TOT |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 0.244 | 0.435 | 0.678 | 0.032 | 0.051 | 0.083 | 0.579 | 0.481 | 1.060 |
| 20 | 0.487 | 0.870 | 1.357 | 0.064 | 0.101 | 0.166 | 1.158 | 0.961 | 2.119 |
| 30 | 0.618 | 1.136 | 1.754 | 0.081 | 0.115 | 0.196 | 1.694 | 1.441 | 3.135 |
| 40 | 1.011 | 1.384 | 2.395 | 0.146 | 0.125 | 0.272 | 3.695 | 1.922 | 5.617 |
| 50 | 1.491 | 1.644 | 3.135 | 0.228 | 0.137 | 0.364 | 6.068 | 2.436 | 8.504 |
| 60 | 1.885 | 1.929 | 3.814 | 0.295 | 0.150 | 0.445 | 7.830 | 3.028 | 10.858 |
| 70 | 2.279 | 2.215 | 4.494 | 0.361 | 0.164 | 0.526 | 9.593 | 3.620 | 13.213 |
| 80 | 2.582 | 2.437 | 5.019 | 0.416 | 0.176 | 0.592 | 10.966 | 4.103 | 15.069 |
| 90 | 2.676 | 2.510 | 5.186 | 0.444 | 0.182 | 0.626 | 11.431 | 4.332 | 15.764 |
| 100 | 2.770 | 2.583 | 5.352 | 0.472 | 0.188 | 0.660 | 11.897 | 4.561 | 16.458 |
| 110 | 2.863 | 2.655 | 5.518 | 0.499 | 0.194 | 0.693 | 12.362 | 4.791 | 17.153 |
| 120 | 2.952 | 2.723 | 5.676 | 0.526 | 0.201 | 0.727 | 12.816 | 5.029 | 17.846 |
| 130 | 3.004 | 2.780 | 5.784 | 0.544 | 0.209 | 0.753 | 13.169 | 5.290 | 18.459 |
| 140 | 3.056 | 2.832 | 5.888 | 0.562 | 0.218 | 0.780 | 13.523 | 5.562 | 19.084 |

| | azote | | | phos. | | | pot | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | T4L7 | T4L8 | TOT | T4L7 | T4L8 | TOT | T4L7 | T4L8 | TOT |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 0.030 | 0.281 | 0.311 | 0.006 | 0.053 | 0.060 | 0.132 | 0.314 | 0.446 |
| 20 | 0.060 | 0.562 | 0.622 | 0.013 | 0.106 | 0.119 | 0.263 | 0.629 | 0.892 |
| 30 | 0.095 | 0.705 | 0.799 | 0.020 | 0.116 | 0.136 | 0.455 | 0.888 | 1.344 |
| 40 | 0.276 | 0.831 | 1.108 | 0.042 | 0.120 | 0.162 | 1.179 | 1.142 | 2.321 |
| 50 | 0.787 | 0.958 | 1.745 | 0.097 | 0.124 | 0.221 | 3.001 | 1.396 | 4.397 |
| 60 | 1.121 | 1.175 | 2.296 | 0.145 | 0.133 | 0.279 | 4.312 | 1.929 | 6.241 |
| 70 | 1.435 | 1.403 | 2.838 | 0.193 | 0.143 | 0.336 | 5.565 | 2.493 | 8.058 |
| 80 | 1.750 | 1.630 | 3.380 | 0.241 | 0.153 | 0.393 | 6.818 | 3.057 | 9.875 |
| 90 | 1.865 | 1.691 | 3.556 | 0.263 | 0.158 | 0.422 | 7.300 | 3.245 | 10.546 |
| 100 | 1.958 | 1.734 | 3.692 | 0.283 | 0.163 | 0.447 | 7.697 | 3.392 | 11.089 |
| 110 | 2.051 | 1.776 | 3.827 | 0.303 | 0.168 | 0.472 | 8.093 | 3.539 | 11.632 |
| 120 | 2.144 | 1.818 | 3.963 | 0.323 | 0.173 | 0.497 | 8.489 | 3.685 | 12.175 |
| 130 | 2.200 | 1.842 | 4.042 | 0.339 | 0.175 | 0.514 | 8.787 | 3.809 | 12.597 |
| 140 | 2.239 | 1.864 | 4.103 | 0.352 | 0.177 | 0.529 | 9.044 | 3.931 | 12.975 |
| 144 | 2.254 | 1.879 | 4.133 | 0.357 | 0.180 | 0.537 | 9.146 | 4.032 | 13.178 |

| | azote | | | phos. | | | pot | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | T5L9 | T5L10 | TOT | T5L9 | T5L10 | TOT | T5L9 | T5L10 | TOT |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 0.900 | 0.105 | 1.005 | 0.080 | 0.007 | 0.087 | 1.198 | 0.164 | 1.362 |
| 20 | 1.120 | 0.209 | 1.330 | 0.102 | 0.015 | 0.116 | 1.554 | 0.328 | 1.883 |
| 30 | 1.174 | 0.289 | 1.463 | 0.110 | 0.019 | 0.129 | 1.753 | 0.518 | 2.271 |
| 40 | 1.317 | 0.357 | 1.674 | 0.132 | 0.022 | 0.154 | 2.357 | 0.719 | 3.076 |
| 50 | 1.652 | 0.426 | 2.078 | 0.183 | 0.024 | 0.207 | 3.723 | 0.921 | 4.644 |
| 60 | 1.854 | 0.501 | 2.355 | 0.228 | 0.035 | 0.263 | 4.708 | 1.172 | 5.880 |
| 70 | 2.040 | 0.577 | 2.617 | 0.272 | 0.047 | 0.318 | 5.651 | 1.429 | 7.080 |
| 80 | 2.227 | 0.653 | 2.880 | 0.315 | 0.059 | 0.374 | 6.594 | 1.685 | 8.279 |
| 90 | 2.316 | 0.676 | 2.992 | 0.338 | 0.062 | 0.400 | 7.099 | 1.858 | 8.956 |
| 100 | 2.394 | 0.694 | 3.088 | 0.359 | 0.064 | 0.422 | 7.555 | 2.020 | 9.575 |
| 110 | 2.473 | 0.711 | 3.184 | 0.379 | 0.065 | 0.445 | 8.011 | 2.183 | 10.194 |
| 120 | 2.551 | 0.728 | 3.279 | 0.400 | 0.067 | 0.467 | 8.467 | 2.346 | 10.813 |
| 130 | 2.598 | 0.761 | 3.359 | 0.415 | 0.070 | 0.485 | 8.782 | 2.624 | 11.406 |
| 140 | 2.632 | 0.795 | 3.427 | 0.428 | 0.073 | 0.501 | 9.037 | 2.914 | 11.951 |
| 141 | 2.636 | 0.798 | 3.434 | 0.430 | 0.073 | 0.503 | 9.062 | 2.943 | 12.005 |
| 143 | 2.643 | 0.814 | 3.457 | 0.432 | 0.075 | 0.508 | 9.113 | 3.053 | 12.166 |
| 144 | 2.646 | 0.905 | 3.551 | 0.434 | 0.076 | 0.510 | 9.138 | 3.182 | 12.321 |

| | azote | | | phos. | | | pot | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | T6L11 | T6L12 | TOT | T6L11 | T6L12 | TOT | T6L11 | T6L12 | TOT |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 0.276 | 0.346 | 0.623 | 0.049 | 0.063 | 0.112 | 1.194 | 0.672 | 1.866 |
| 20 | 0.553 | 0.693 | 1.245 | 0.098 | 0.126 | 0.224 | 2.389 | 1.344 | 3.733 |
| 30 | 0.685 | 1.064 | 1.749 | 0.120 | 0.146 | 0.266 | 3.364 | 2.397 | 5.761 |
| 40 | 1.086 | 1.435 | 2.521 | 0.188 | 0.166 | 0.354 | 6.582 | 3.451 | 10.032 |
| 50 | 1.465 | 1.78 | 3.244 | 0.261 | 0.182 | 0.443 | 9.623 | 4.435 | 14.058 |
| 60 | 1.725 | 2.084 | 3.809 | 0.326 | 0.192 | 0.518 | 11.728 | 5.315 | 17.043 |
| 70 | 1.985 | 2.389 | 4.374 | 0.391 | 0.202 | 0.593 | 13.833 | 6.195 | 20.029 |
| 80 | 2.184 | 2.587 | 4.771 | 0.444 | 0.210 | 0.654 | 15.399 | 6.826 | 22.225 |
| 90 | 2.292 | 2.626 | 4.918 | 0.479 | 0.215 | 0.695 | 16.156 | 7.082 | 23.238 |
| 100 | 2.400 | 2.665 | 5.065 | 0.515 | 0.220 | 0.735 | 16.913 | 7.337 | 24.251 |
| 110 | 2.508 | 2.703 | 5.212 | 0.550 | 0.225 | 0.776 | 17.671 | 7.593 | 25.264 |
| 120 | 2.601 | 2.735 | 5.335 | 0.582 | 0.230 | 0.811 | 18.329 | 7.823 | 26.152 |
| 130 | 2.630 | 2.755 | 5.385 | 0.595 | 0.233 | 0.828 | 18.592 | 8.016 | 26.608 |
| 138 | 2.654 | 2.778 | 5.432 | 0.606 | 0.239 | 0.844 | 18.802 | 8.248 | 27.050 |

| T3 pourtour | Charge (kg) azote | phos. | pot |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 22 | 0.536 | 0.071 | 1.274 |
| 33 | 0.648 | 0.085 | 1.851 |
| 47 | 1.373 | 0.208 | 5.539 |
| 77 | 2.554 | 0.408 | 10.826 |
| 119 | 2.947 | 0.524 | 12.781 |
| 140 | 3.056 | 0.562 | 13.523 |

| T3 centre | Charge (kg) azote | phos. | pot |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 21 | 0.913 | 0.107 | 1.009 |
| 47 | 1.558 | 0.132 | 2.258 |
| 77 | 2.415 | 0.174 | 4.034 |
| 117 | 2.706 | 0.198 | 4.951 |
| 137 | 2.819 | 0.216 | 5.472 |
| 140 | 2.832 | 0.218 | 5.562 |

| T4 pourtour | Charge (kg) azote | phos. | pot |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 25 | 0.074 | 0.016 | 0.329 |
| 37 | 0.123 | 0.025 | 0.632 |
| 51 | 0.838 | 0.102 | 3.184 |
| 81 | 1.781 | 0.245 | 6.944 |
| 123 | 2.172 | 0.329 | 8.608 |
| 144 | 2.254 | 0.357 | 9.146 |

| T4 centre | Charge (kg) azote | phos. | pot |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 21 | 0.591 | 0.112 | 0.660 |
| 51 | 0.971 | 0.125 | 1.421 |
| 81 | 1.653 | 0.154 | 3.113 |
| 121 | 1.823 | 0.174 | 3.700 |
| 141 | 1.866 | 0.177 | 3.943 |
| 144 | 1.879 | 0.180 | 4.032 |

| T5 pourtour | Charge (kg) azote | phos. | pot |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 12 | 1.080 | 0.096 | 1.438 |
| 26 | 1.151 | 0.106 | 1.642 |
| 37 | 1.216 | 0.117 | 1.947 |
| 51 | 1.686 | 0.188 | 3.860 |
| 81 | 2.246 | 0.320 | 6.688 |
| 123 | 2.574 | 0.406 | 8.604 |
| 144 | 2.646 | 0.434 | 9.138 |

| T5 centre | Charge (kg) azote | phos. | pot |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 23 | 0.241 | 0.017 | 0.377 |
| 51 | 0.433 | 0.024 | 0.941 |
| 81 | 0.660 | 0.060 | 1.711 |
| 121 | 0.730 | 0.068 | 2.362 |
| 141 | 0.798 | 0.073 | 2.943 |
| 143 | 0.814 | 0.075 | 3.053 |
| 144 | 0.905 | 0.076 | 3.182 |

| T6 pourtour | Charge (kg) azote | phos. | pot |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 21 | 0.580 | 0.103 | 2.508 |
| 32 | 0.720 | 0.125 | 3.649 |
| 46 | 1.361 | 0.236 | 8.781 |
| 76 | 2.140 | 0.429 | 15.096 |
| 118 | 2.595 | 0.579 | 18.276 |
| 138 | 2.654 | 0.606 | 18.802 |

| T6 centre | Charge (kg) azote | phos. | pot |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20 | 0.693 | 0.126 | 1.344 |
| 46 | 1.658 | 0.178 | 4.083 |
| 76 | 2.572 | 0.208 | 6.724 |
| 116 | 2.727 | 0.228 | 7.746 |
| 136 | 2.767 | 0.235 | 8.131 |
| 138 | 2.778 | 0.239 | 8.248 |

T1

| jours | N | P | K |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20 | 0.302 | 0.033 | 0.501 |
| 69 | 0.856 | 0.066 | 2.161 |
| 138 | 0.874 | 0.068 | 2.293 |

T2

| jours | N | P | K |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 52 | 0.176 | 0.007 | 0.563 |
| 97 | 0.421 | 0.034 | 1.569 |

Bibliothèque Cécile - Rouleau
QMC A 453 118