

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ

SÉRIE DE MONOGRAPHIES

N° 31

**COMPOSTAGE
ET ASSAINISSEMENT**

COMPOSTAGE ET ASSAINISSEMENT

Harold B. GOTAAS

*Professeur de Génie sanitaire,
Département du Génie civil, Université de Californie,
Berkeley, Calif., Etats-Unis d'Amérique*



ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ

PALAIS DES NATIONS

GENÈVE

1959

NOTE

*Les travaux publiés dans la Série de Monographies
de l'Organisation mondiale de la Santé
n'engagent que leurs auteurs*

Dans cette publication, les noms déposés sont écrits avec une majuscule initiale. La mention de firmes et de produits commerciaux n'implique pas que ces firmes et produits sont agréés ou recommandés par l'Organisation mondiale de la Santé de préférence à d'autres.

IMPRIMÉ EN SUISSE

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Avant-propos	7
Introduction	9
Chapitre 1. La décomposition des matières organiques	13
Chapitre 2. Importance du compostage du point de vue sanitaire et agricole	19
Chapitre 3. Aperçu historique	25
Chapitre 4. Volume et composition des matières brutes utilisées	35
Chapitre 5. Principes fondamentaux	48
Chapitre 6. Méthodes et plans applicables dans les grandes villes	117
Chapitre 7. Méthodes applicables dans les villages et les petites villes	151
Chapitre 8. Méthodes applicables dans les fermes isolées . . .	174
Chapitre 9. Digesteurs de fumiers et d'excreta pour la récupération du méthane à la ferme et au village	179
Références bibliographiques	203
Index	209

Avant-propos

Les maladies auxquelles les excréments de l'homme servent de véhicule normal, en particulier les maladies parasitaires, sont largement répandues et prélèvent un lourd tribut en souffrances et en vies humaines. Dans les zones où les excréta sont couramment employés comme engrais, il n'est pas rare que 90 % de la population soient infestés par le même parasite et que la totalité des habitants souffrent d'une ou de plusieurs des diverses helminthiases communes. L'OMS est directement intéressée par la mortalité due à ces maladies, surtout chez les nourrissons et les jeunes enfants, et par la mauvaise santé générale de tous les groupes d'âge, qui, sans causer nécessairement de décès, réduit notablement la vigueur physique et la capacité de travail.

On a beaucoup écrit sur la question de l'emploi comme engrais des déchets dus aux activités de l'individu et de la collectivité. Leur intérêt pratique n'est guère douteux et, à mesure que l'on mettra au point des procédés permettant de rendre leur traitement relativement plus économique, leur utilisation s'étendra de plus en plus. Tout en reconnaissant la nécessité d'entretenir la fertilité du sol, l'OMS désire que les pratiques agricoles soient conformes aux règles de la santé publique. Or, il semble qu'il y ait un conflit entre le souci d'échapper aux dangers que comporte l'utilisation agricole des déchets et des excréta, et la nécessité de recourir aux engrais organiques pour améliorer les récoltes. Une solution consiste à rendre à peu près inoffensives les substances nuisibles par la préparation bien contrôlée de composts.

L'art de préparer des composts est très ancien ; certains de ses principes fondamentaux sont connus et appliqués depuis des siècles. Cependant, au cours des récentes années, l'étude scientifique des processus biologiques et chimiques qu'il fait intervenir a fait de rapides progrès. Ces travaux ont permis de dégager certains facteurs qui peuvent contribuer à l'élaboration d'un compost à la fois intéressant pour l'agriculture et relativement inoffensif pour la santé publique.

Puisse la publication d'un ouvrage consacré à ces principes faciliter une amélioration générale dans ce domaine.

Introduction

L'existence d'un lien entre la maladie et les déchets liquides ou solides de l'homme est admise depuis les temps les plus reculés. De même, l'idée que ces déchets ont des rapports avec la fertilité du sol et l'abondance des moissons est aussi vieille que l'agriculture. On peut même penser que l'emploi de ces engrais d'origine humaine est l'un des facteurs principaux de la durée de certaines civilisations antiques. Cependant, il n'y a guère plus d'un siècle que l'homme a commencé à acquérir une connaissance vraiment scientifique de la nature exacte des processus ainsi mis en jeu, et il lui reste encore à percer les secrets de la nature sur de nombreux points intéressant la santé, la production des denrées alimentaires et le traitement des déchets.

Tant que seuls de petits groupes nomades se déplaçaient d'un lieu à l'autre, la contamination du milieu et la propagation de la maladie qui en résultait n'avait pas de graves conséquences. Mais lorsque la densité des populations s'accrut et que les habitants de certaines régions devinrent sédentaires, l'utilisation sans précaution des déchets fit sentir ses effets : les maladies épidémiques et la déchéance physique apparurent. D'autre part, la demande de produits alimentaires augmentant cependant que la fertilité du sol diminuait, les engrais naturels prirent de l'importance : il s'agissait en effet d'améliorer la production agricole afin d'obtenir assez de denrées pour survivre. Aucun agriculteur n'ignore que l'addition de déchets organiques au sol améliore son rendement mais, faute d'apprécier les aspects sanitaires de la question, on continue encore trop souvent à utiliser ces déchets sans tenir compte des règles de l'hygiène.

Malgré la forte densité de leur population, qui serait de nature à faciliter la contagion, les centres urbains sont actuellement, dans la plupart des régions du monde, moins atteints que les régions rurales par les maladies qui, comme les maladies intestinales, se transmettent à la faveur d'une mauvaise hygiène du milieu. La cause essentielle de cette situation paradoxale est le manque d'hygiène dans l'évacuation des déchets à la campagne.

Etant donné que l'organisme animal ne retient qu'une très petite quantité de l'azote, du phosphore, de la potasse et des oligo-éléments ingérés, la majeure partie de ces substances que contenait la nourriture se retrouvent dans les excréta, les eaux usées et le fumier. Les détritits ménagers et les débris organiques contiennent aussi de nombreux éléments nutritifs venus du sol qui valent la peine d'être récupérés, quand on peut le faire d'une manière salubre et économique.

La présente monographie a pour objet d'exposer les méthodes et les techniques par lesquelles les déchets organiques qui constituent un danger

pour la santé et un véhicule pour la maladie peuvent être évacués et utilisés en agriculture sans enfreindre les règles de l'hygiène. Protection de la santé et récupération de produits intéressants pour l'agriculture sont deux préoccupations importantes et nullement incompatibles. En effet, moyennant une technique convenable, il est souvent possible tout en traitant les déchets de façon salubre d'accroître considérablement la récupération des produits nutritifs pour les plantes et ainsi d'améliorer la production alimentaire. L'azote, le phosphore, la potasse et les oligo-éléments constituent un actif important pour l'agriculture. Y puiser sans jamais le renouveler convenablement, c'est aller vers la faillite agricole, la disette, la misère et l'affaiblissement de ceux dont le bien-être dépend, dans une large mesure, de la production du sol. De même, le fumier animal dont on aurait besoin pour fertiliser le sol est parfois recueilli dans des conditions contraires à l'hygiène et utilisé comme combustible, ce qui entraîne une perte de produits nutritifs et un accroissement du danger de maladie.

Bien souvent, le problème de la mise en valeur économique d'une région donnée, constitue un tout dont les parties, intimement liées les unes aux autres, s'appellent hygiène, propagation des maladies, disette, amélioration de l'agriculture, traitement des déchets, combustible et énergie. Dans les régions du monde où la production de denrées alimentaires et d'énergie est souvent inférieure au minimum nécessaire pour maintenir la population en bonne santé, et où les ressources énergétiques ou autres ne sont pas suffisantes pour fournir des engrais de remplacement, la récupération et l'utilisation de façon salubre des éléments nutritifs contenus dans les déchets peuvent contribuer puissamment à améliorer l'alimentation, la santé et la prospérité de la population. Le retour des détritiques urbains vers les terres pauvres pourrait renverser complètement la tendance à la diminution constante de la production agricole.

Son objet étant de montrer comment l'on peut utiliser en agriculture les éléments intéressants contenus dans les déchets humains, tout en favorisant l'assainissement et en améliorant l'hygiène du milieu, la présente monographie ne consacrera pas de longs développements à l'emploi des engrais en agriculture ou aux qualités relatives des engrais organiques ou inorganiques. Il suffira de noter que les déchets animaux et humains contiennent des produits nutritifs précieux que l'on peut récupérer avec profit.

Les processus naturels que met en jeu la transformation des déchets en composts sont aussi vieux que la nature elle-même, mais ils ont été souvent mal compris ou négligés lorsqu'il s'est agi de les utiliser dans de bonnes conditions d'hygiène et d'économie. Les principes qui sont à la base de certaines techniques spéciales et commercialisées de préparation des composts ont même été entourés d'un voile de mystère quasi magique. C'est pourquoi il a paru important, dans la rédaction de la présente monographie, de confronter et d'examiner les aspects fondamentaux du compostage pour dégager les règles dont doit s'inspirer une saine pratique.

L'auteur s'est efforcé d'analyser les résultats connus de l'expérience et de la recherche, en s'attachant plus particulièrement à mettre en lumière les procédés techniques modernes. Il n'a pas été possible de reproduire, dans un ouvrage de volume réduit, tous les renseignements disponibles. L'auteur s'est néanmoins efforcé de passer en revue toutes les idées fondamentales en s'appuyant sur les données de la pratique et de l'expérimentation. Il a fallu omettre de nombreux renseignements sur bien des points importants, mais la bibliographie est assez étendue pour que le lecteur puisse se reporter à la documentation scientifique détaillée s'il le désire.

Il n'existe aucune méthode ou technique de compostage qui puisse être recommandée universellement pour toutes les régions et dans toutes les conditions. Les facteurs économiques, climatiques, sociaux ou autres dicteront le choix des procédés qui conviennent le mieux à une situation donnée. Néanmoins, l'auteur espère que les méthodes qu'il décrit faciliteront la mise en valeur économique de nombreuses régions par le traitement et l'utilisation salubre des déchets, et que ce recueil et cette analyse de renseignements fondamentaux sur l'élaboration des composts permettront à certains préparateurs d'accroître l'efficacité de leurs techniques personnelles.

* * *

L'auteur adresse ses remerciements et exprime sa reconnaissance aux personnes suivantes qui ont revu l'avant-projet de manuscrit, qui lui ont présenté des observations et des critiques, ou qui lui ont fourni de précieux renseignements, et dans certains cas des illustrations :

M. C. N. Acharya, Indian Agricultural Research Institute, La Nouvelle-Delhi, Inde

Dr H. G. Baity, Directeur de la Division de l'Assainissement, OMS, Genève, Suisse

M. P. Bierstein, Conseiller pour l'Assainissement, Bureau régional de l'OMS pour le Pacifique occidental, Manille, Philippines

M. L. P. Brunt, Consulting Engineer, Chiswick, Angleterre

M. R. N. Clark, Conseiller principal en Génie sanitaire, OMS, Genève, Suisse

M. B. H. Dieterich, Institut für Gesundheitstechnik, Stuttgart, République fédérale d'Allemagne

M. H. G. Dion, Spécialiste des Sols, FAO, Rome, Italie

Dr C. G. Golueke, Sanitary Engineering Laboratory, University of California, Etats-Unis d'Amérique

Lady Howard, Albert Howard Foundation of Organic Husbandry,
Kent, Angleterre

M. P. R. Krige, South African Council for Scientific and Industrial
Research, Pretoria, Union Sud-Africaine

M. J. N. Lanoix, Ingénieur sanitaire, OMS, Genève, Suisse

M. P. H. McGauhey, Sanitary Engineering Laboratory, University
of California, Etats-Unis d'Amérique

M. H. J. Page, Spécialiste des Sols, FAO, Rome, Italie

M. R. Pavanello, Conseiller pour l'Assainissement, Bureau régional
de l'OMS pour l'Europe, Copenhague, Danemark

M. N. D. R. Schaafsma, Ingénieur sanitaire, Bureau régional de l'OMS
pour l'Afrique, Brazzaville, Afrique Equatoriale Française

M. J. C. Scott, Perth, Ecosse

M. J. P. J. van Vuren, Kroonstad, Orange Free State, Union Sud-
Africaine

M. W. A. G. Weststrate, Directeur, N. V. Vuilafvoer Maatschappij,
Amsterdam, Pays-Bas

Professeur F. Wilson, Makerere College, Kampala, Ouganda

M. J. C. Wylie, Ingénieur, Dumfries, Ecosse

H. B. GOTAAS

LA DÉCOMPOSITION DES MATIÈRES ORGANIQUES

La décomposition ou stabilisation des matières organiques sous l'effet de facteurs biologiques se produit dans la nature depuis que la vie est apparue sur notre planète. A une époque récente, l'homme s'est efforcé de contrôler et d'utiliser directement ce phénomène naturel pour évacuer et récupérer, dans des conditions hygiéniques, les matières usées organiques ; le produit final ainsi obtenu a reçu le nom de « compost ».

On peut distinguer, d'une façon générale, deux processus : *a*) décomposition et stabilisation aérobies, et *b*) fermentation anaérobie. Dans les deux cas, des bactéries, ou des champignons, moisissures et autres organismes saprophytes se nourrissent de matières organiques telles que les débris végétaux, le fumier animal, les excréta^a et autres rebuts, et les convertissent en produits plus stables.

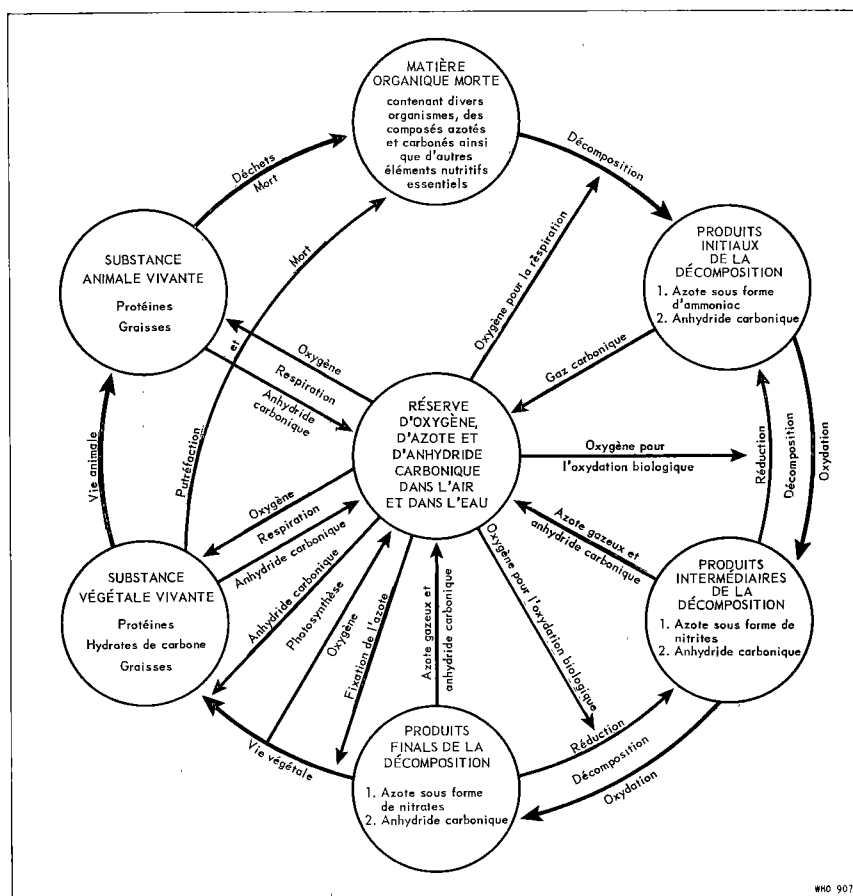
Décomposition aérobie

Lorsque les matières organiques se décomposent en présence d'oxygène, le processus est dit « aérobie ». Dans ce cas, des organismes vivants utilisant l'oxygène se nourrissent de la matière organique et en absorbent l'azote, le phosphore, une partie du carbone, de même que les autres substances nutritives qui servent à élaborer le protoplasme cellulaire. La majeure partie du carbone sert de source d'énergie à ces organismes ; il est brûlé et rejeté sous forme de gaz carbonique (CO_2). Etant donné qu'ils y trouvent à la fois une source d'énergie et un élément constitutif du protoplasme, les organismes vivants utilisent beaucoup plus de carbone que d'azote. En général, les deux tiers environ de carbone sont éliminés sous forme de CO_2 par la respiration, tandis que l'autre tiers se combine à l'azote dans les cellules. Si la quantité de carbone contenue dans les matières organiques en décomposition excède par trop la quantité d'azote, l'activité biologique diminue et il faut plusieurs générations d'organismes pour consommer la plus grande partie du carbone. Lorsque certains organismes meurent, l'azote et le carbone qu'ils ont accumulés deviennent disponibles pour les autres. Ceux-ci, à leur tour, pour employer l'azote

^a En beaucoup d'endroits, les matières fécales et l'urine sont recueillies, accumulées et utilisées séparément. Dans la présente monographie, l'expression « excréta » désigne le mélange de matières fécales et d'urine ; le terme « fèces » désigne les matières fécales sans l'urine.

provenant des cellules mortes à l'élaboration de leur matière protoplasmique, ont besoin d'un excès de carbone, qu'ils transforment en CO_2 . Ainsi, la quantité de carbone diminue et la quantité fixe d'azote est remise dans le circuit. Enfin, lorsque la proportion carbone-azote est suffisamment réduite, l'azote se dégage sous forme d'ammoniac. Dans des conditions favorables, une certaine quantité d'ammoniac peut être oxydée pour donner des nitrates. Le phosphore, la potasse et divers olégo-éléments sont également indispensables à la croissance biologique. Ces corps existent normalement en quantités plus que suffisantes dans les matières utilisées pour la préparation des composts et il n'y a, sous ce rapport, aucune difficulté ; nous n'étudierons donc pas ici leur métabolisme dans les cellules vivantes.

FIG. 1. CYCLE DE L'AZOTE ET DU CARBONE DANS LA DÉCOMPOSITION EN AÉROBIOSE *



* D'après Imhoff & Fair,³⁷ avec l'autorisation de John Wiley & Sons, Inc., New York

La figure 1 illustre le cycle du carbone et de l'azote dans le processus de décomposition aérobie, qui est le plus commun dans la nature. C'est celui qui se déroule à la surface du sol, par exemple dans les forêts, où les détritux végétaux et animaux se transforment en un humus relativement stable ou terreau. Cette opération ne présente aucun inconvénient lorsqu'elle s'accomplit en présence d'une quantité suffisante d'oxygène. Au cours de l'oxydation du carbone en CO_2 , une grande quantité d'énergie se dégage sous forme de chaleur. Par exemple, la décomposition aérobie d'une molécule-gramme de glucose donne 484 à 674 kilocalories (kcal). Si les matières organiques sont entassées ou disposées de façon à assurer une certaine isolation, leur température s'élèvera au cours de la fermentation à plus de 70°C. Toutefois, au-dessus de 65 à 70°C, l'activité bactérienne décroît et la décomposition se ralentit. Au-dessus de 45°C environ, les organismes thermophiles qui croissent à la température de 45 à 65°C se développent et remplacent les bactéries mésophiles. Seules quelques variétés thermophiles conservent leur activité au-delà de 65°C. Aux températures élevées, l'oxydation se produit plus rapidement qu'aux températures moyennes et la décomposition exige donc moins de temps. Ainsi qu'on le verra plus loin en détail (page 84) les températures élevées détruisent les germes pathogènes ainsi que les protozoaires, les œufs d'ankylostomes et les graines de mauvaises herbes, tous organismes qui sont dangereux, les uns pour la santé, les autres pour l'agriculture lorsque le compost, une fois prêt, est déposé sur le sol.

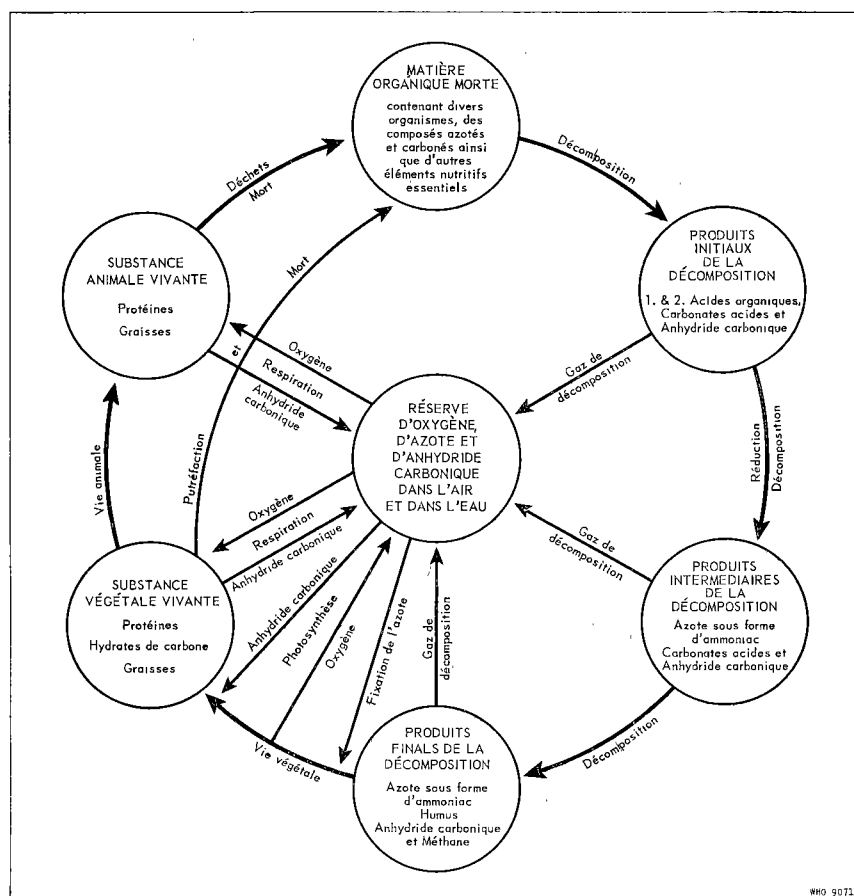
L'oxydation aérobie des matières organiques ne provoque aucune odeur désagréable. Si des odeurs se dégagent, elles sont dues, soit au fait que le processus n'est pas entièrement aérobie, soit à la présence de substances fétides ne provenant pas de l'oxydation. La décomposition aérobie qui produit le compost, peut s'accomplir dans des digesteurs mécaniques, dans des fosses, des bacs, en piles ou en tas, à condition que la quantité d'oxygène soit suffisante. Il est nécessaire de retourner de temps à autre ces matières ou d'y introduire de l'oxygène par toute autre méthode, afin de maintenir les conditions nécessaires à l'aérobiose.

Fermentation anaérobie

La décomposition putride des matières organiques s'effectue en anaérobiose. Le métabolisme des organismes vivants anaérobies dissocie les composés organiques nutritifs par réduction. Comme dans le processus aérobie, ils utilisent l'azote, le phosphore et autres substances nutritives pour former leur protoplasme cellulaire, mais ils réduisent l'azote organique en acides organiques et en ammoniac. Le carbone qui n'est pas utilisé pour constituer les protéines cellulaires se dégage surtout sous forme de

méthane (CH_4). Une faible partie du carbone peut être libérée par respiration sous forme de CO_2 .

FIG. 2. CYCLE DE L'AZOTE ET DU CARBONE DANS LA DÉCOMPOSITION EN ANAÉROBIOSE *



* D'après Imhoff & Fair,⁹⁷ avec l'autorisation de John Wiley & Sons, Inc., New York

Ce processus se produit dans la nature lors de la décomposition des boues organiques au fond des marais et dans les matières organiques enfouies dans la terre, auxquelles l'oxygène n'a pas accès. Le gaz des marais est composé principalement de CH_4 . La réduction intensive des substances organiques par la putréfaction s'accompagne en général d'odeurs désagréables dues à l'hydrogène sulfuré et aux composés organiques réduits contenant du soufre, tels que les mercaptans.

Etant donné que la destruction anaérobie des substances organiques est un processus de réduction, le produit final, l'humus, subit une certaine oxydation aérobie lorsqu'il est déposé sur le sol. Cette oxydation est assez faible, se produit rapidement et n'a pas d'importance pour l'utilisation de ces matières sur le terrain.

La figure 2 illustre le cycle du carbone et de l'azote dans le processus de décomposition en anaérobiose. L'énergie calorifique libérée n'est pas suffisante pour élever sensiblement la température des matières en putréfaction. De toute l'énergie potentielle contenue dans une molécule-gramme de glucose, la dissociation anaérobie ne dégage que 26 kcal, contre 484 à 674 kcal en fermentation aérobie. Le potentiel énergétique du carbone passe dans le méthane : la combustion de CH_4 en CO_2 dégage une grande quantité de chaleur. Aussi le méthane produit par la destruction anaérobie des matières organiques est-il souvent utilisé comme carburant dans les moteurs ou comme combustible.

La faible chaleur produite par la fermentation anaérobie est un inconvénient certain pour le traitement des excréta et autres substances contaminées, dans lesquelles, pour des raisons d'hygiène publique, il est nécessaire de détruire les germes pathogènes et les parasites. En effet, il ne se produit pas de températures élevées capable de détruire les organismes pathogènes. Ceux-ci finissent bien par disparaître de la masse organique, en raison des mauvaises conditions de milieu qu'elle crée et de certains antagonismes biologiques. Mais cette disparition est lente et il faut conserver les matières organiques pendant 6 à 12 mois pour assurer une destruction à peu près complète des œufs d'*Ascaris*, qui sont les plus résistants des parasites pathogènes transmis par les matières fécales.

Pour préparer le compost en anaérobiose, on peut mettre les matières en tas ou dans des fosses ; dans les deux cas, la masse doit être volumineuse, bien tassée et contenir 40 à 75 % d'humidité pour ne laisser pénétrer qu'une faible quantité d'oxygène ; on peut aussi employer des bacs contenant 80 à 99 % d'eau, de sorte que la substance organique demeure en suspension dans le liquide. Si les matières sont entassées ou déposées dans des fosses sans être recouvertes d'eau, le dégagement d'odeurs risque d'être très gênant. Au contraire, lorsqu'elles sont submergées, les gaz sont dissous dans l'eau et ne se dégagent en général que lentement dans l'atmosphère. Si l'on renouvelle l'eau de temps à autre lorsqu'on prélève une partie des matières, la gêne est insignifiante.

Le compost peut donc être préparé soit en aérobie, soit en anaérobiose. De leur côté, certaines bactéries sont à la fois aérobies et anaérobies : elles peuvent pousser avec ou sans oxygène, mieux cependant dans un cas que dans l'autre. C'est sans doute ce caractère facultatif qui explique, au moins en partie, la disproportion entre la faible quantité d'oxygène présente dans les interstices de la pile de matières (y compris le gaz qui peut diffuser à travers la masse) et le degré d'oxydation qui se produit une

fois que les matières ont été entassées et avant qu'on ne les ait retournées ou aérées par un autre procédé. Dans les tas de compost en décomposition aérobie, la température atteint 55 à 65°C en 1 à 5 jours, selon la matière employée et les conditions dans lesquelles l'opération est réalisée. On peut aussi maintenir cette température pendant plusieurs jours avant de procéder à une nouvelle aération. Or la chaleur nécessaire pour produire et maintenir ces températures doit provenir de la décomposition aérobie, qui exige de l'oxygène. Mais au bout d'un certain temps, si la masse n'est pas aérée, il s'y crée des conditions d'anaérobiose. C'est donc probablement entre le moment où l'oxygène est épuisé et celui où l'anaérobiose devient évidente, qu'interviennent les bactéries facultatives.

Dans cette monographie l'expression « compostage en aérobie » sera employée dans son acception courante, pour désigner le processus qui exige une quantité considérable d'oxygène et ne présente aucun des traits caractéristiques de la putréfaction anaérobie. Dans son sens moderne, le compostage en aérobie peut être défini comme un processus au cours duquel, si les conditions de milieu sont favorables, des organismes aérobies facultatifs, principalement thermophiles, utilisent des quantités considérables d'oxygène pour décomposer les matières organiques et les transformer en humus relativement stable.

L'expression « compostage en anaérobiose » désigne ici la décomposition putride de la matière organique par réduction en l'absence d'oxygène, avec production, entre autres, de CH_4 et de H_2S .

IMPORTANCE DU COMPOSTAGE DU POINT DE VUE SANITAIRE ET AGRICOLE

Dans tous les pays du monde, l'hygiène et l'agriculture ont des rapports très étroits. Dans les régions agricoles, l'utilisation des matières usées d'origine humaine et animale présente un grand intérêt, à la fois pour la santé publique et pour les cultures.

Mais ces questions deviennent aussi d'actualité dans les régions très industrialisées, en raison : a) des difficultés croissantes que présente l'évacuation ordonnée et salubre des grandes quantités de matières usées provenant des villes ; b) de la menace croissante que fait peser sur la fertilité du sol la quasi-disparition du fumier animal, sous-produit autrefois abondant de la production et de la consommation d'énergie ; et c) du rendement intensif et croissant que l'on exige des terres cultivées, en vue de produire une plus grande quantité de denrées alimentaires. Dans les pays très industrialisés, le problème est relativement récent, mais il est très important et demandera, à l'avenir, des études approfondies pour déterminer comment les énormes quantités de matières usées et contaminées produites par les grandes villes peuvent être non seulement évacuées, mais aussi utilisées dans des conditions satisfaisantes.

Les techniques modernes de compostage, proposées tout d'abord par Sir Albert Howard^{32, 33, 35} et ses collaborateurs^{5, 41} à la suite d'observations effectuées dans l'Inde, puis développées dans ce pays par Acharya et Subrahmanyam^{1, 3} ont été étudiées de manière très approfondie par Scott⁶⁸ et van Vuren,⁸² par Gotaas et ses collaborateurs — McGauhey, Golueke et Card — à l'Université de Californie,^{23, 24, 49, 71, 81} et par beaucoup d'autres chercheurs dans différentes parties du monde.

Aspects sanitaires

Ils sont au nombre de deux :

L'un est celui du taux élevé de morbidité et de mortalité dû aux maladies transmises par les excréta quand les matières usées organiques sont évacuées et utilisées de façon insalubre.

L'autre est celui de l'amélioration de l'alimentation, facteur important en médecine préventive. Cette amélioration peut être obtenue quand les

matières usées sont rendues à la terre où elles assurent la nutrition des végétaux. Toutefois le bilan alimentaire le plus favorable n'élimine pas la nécessité de détruire ou de faire disparaître les agents des maladies d'origine fécale pour lutter efficacement contre ces affections. La morbidité de ce type est toujours élevée dans les régions agricoles où l'hygiène est précaire et où les matières usées sont utilisées sans précaution.

Les maladies d'origine fécale peuvent être réparties en trois grandes catégories d'après la nature de l'agent : affections dues à des bactéries, à des protozoaires, helminthiases. Dans la première se rangent la dysenterie bacillaire, la fièvre typhoïde, les fièvres paratyphoïdes A et B, l'entérite et le choléra. De même les *Brucella*, qui produisent chez l'homme la fièvre ondulante, peuvent être transmises par les déjections des animaux. *Coxiella burnetii*, agent de la fièvre Q, se rencontre dans le fumier. La seconde catégorie, dans laquelle l'agent causal est un protozoaire comprend la dysenterie amibienne et les diarrhées dues à *Balantidium coli* et autres flagellés. Enfin, les maladies d'origine fécale dues aux helminthes sont la bilharziose, les distomatoses à fasciola, à clonorchis, le paragonimiasis, l'ankylostomiase, l'ascaridiose, la trichocéphalose, la diarrhée de Cochinchine et l'oxyurose.

Scott⁶⁸ a démontré par des études expérimentales effectuées en Chine, que les agents des maladies d'origine fécale sont détruits par le compostage en aérobiose, à condition que la température soit maintenue pendant un temps suffisant à un degré élevé dans toute la masse des matières traitées. Les œufs d'*Ascaris lumbricoides* sont ceux qui résistent le mieux à la destruction. Il y a lieu de souligner que, si les œufs d'*Oxyuris (Enterobius) vermicularis* semblent détruits par le compostage en aérobiose, l'évacuation et le traitement rationnels des matières fécales ne suffisent pas pour lutter contre l'oxyurose, car un facteur d'hygiène personnelle entre en jeu dans la propagation de cette maladie.

Il n'est pas douteux que les germes pathogènes soient rapidement détruits lorsque toutes les parties d'un tas de compost sont soumises à des températures de 60°C environ. puisque ces organismes ne résistent pas à des températures de 55-60°C pendant plus de 30 à 60 minutes. Ainsi, il est établi que *Entamoeba histolytica* est détruite par séjour à des températures de 45-55°C pendant un temps appréciable. Toutefois Scott⁶⁸ a constaté que, dans les tas de compost en aérobiose contenant des quantités particulièrement importantes de matières fécales humaines (70 %) et retournés les cinquième et douzième jours, *Ent. histolytica* et *Ent. coli* survivent jusqu'au douzième jour environ. De même, ses recherches ont montré que les œufs d'*A. lumbricoides* sont détruits avant le quatrième brassage dans les tas de compost en aérobiose retournés les 5^e, 12^e, 22^e et 36^e jours. Scharff⁶⁶ n'a pas trouvé d'œufs d'*A. lumbricoides* au bout de trois semaines de traitement dans un compost formé d'excréments très infectés mélangés à diverses ordures. Au cours des expériences de Scott

et Scarff, on aurait probablement abrégé la survie d'*Ent. histolytica* et d'*A. lumbricoides*, en retournant plus fréquemment les tas de compost, ce qui a pour effet de favoriser l'aérobiose, de maintenir ainsi des températures élevées plus constantes et d'accélérer la décomposition. Ainsi qu'on le verra plus loin, lorsque les tas commencent à subir une anaérobiose, la température s'abaisse et il est nécessaire d'aérer le compost, en le retournant ou par tout autre moyen, afin de maintenir des températures élevées plus constantes.

Il est probable que des antagonismes biologiques, qui apparaissent dans les matières servant à la préparation de compost, influent également sur la destruction des germes pathogènes et des parasites, mais l'expérience montre que la chaleur est toujours le facteur principal et que, si l'on entretient pendant toute l'opération une température élevée, on peut obtenir une destruction complète.

En Afrique du Sud, van Vuren⁸² a pu montrer qu'il n'existait aucun danger d'insalubrité dans des composts préparés rationnellement. Ses résultats sont confirmés par Blair,¹⁰ du Département de l'Hygiène de l'Union Sud-Africaine, par Loots,⁴⁸ du Département de l'Agriculture de l'Union Sud-Africaine, par Hamblin de Johannesburg,⁸² Acharya¹ dans l'Inde, Scharff⁶⁶ en Malaisie, et par d'autres encore en Grande-Bretagne, en Allemagne, en Australie, aux Pays-Bas, au Danemark, et en Nouvelle-Zélande.^{56, 57, 60, 82}

Au cours de la préparation du compost en anaérobiose, qui ne comporte aucune réaction exothermique produisant des températures élevées, il faut six mois pour détruire la majeure partie des œufs de *A. lumbricoides* et la destruction totale exige plus de temps encore. En milieu anaérobiose défavorable, la disparition des parasites est à peu près totale. Il ne subsiste qu'un faible pourcentage d'organismes et d'œufs résistants. Scott a constaté que si la préparation anaérobie du compost, dans des fosses ou en grands tas, est précédée pendant une semaine environ d'une décomposition aérobie accompagnée de températures élevées, les œufs d'*Ascaris* sont détruits.

Dans le cas de fermentation anaérobie de matières contaminées en suspension liquide, comme la digestion des boues, des études sur la fréquence et la durée de survie des germes pathogènes et des parasites ont montré qu'un nombre considérable de ces organismes restent viables pendant des périodes allant de moins d'une semaine à six mois, selon l'organisme, la nature des produits soumis à digestion et les conditions de l'opération.^{14, 58, 72, 82} Là encore, la plupart des rapports montrent que l'élévation de la température favorise la destruction des organismes. Ruchhoft⁶⁴ a constaté que la durée de survie de *Salmonella typhosa* dans les boues entreposées était de 80 jours à 10-16°C et de 13 à 14 jours seulement à 20-22°C. Newton et ses collaborateurs,⁵⁸ dans une étude relative à l'effet du traitement des eaux d'égout sur les œufs et les miracidia de *Schistosoma japonicum*, rapportent qu'il faut deux à trois mois à des tem-

pératures de 8 à 18°C pour détruire les œufs, tandis qu'entre 18 et 24°C, trois semaines suffisent. Keller ⁴⁶ signale que, si la digestion des boues, à des températures moyennes ne détruit pas les œufs de *A. lumbricoides*, la digestion thermophile à 53-54°C est très efficace. Il est intéressant de noter que, dans les régions où les boues d'égout digérées en anaérobiose sont largement utilisées comme engrais, aucun cas de maladie d'origine fécale ne semble leur avoir été attribué.

Dans la préparation du compost en aérobiose, la prolifération des mouches, qui jouent un rôle important dans la transmission des maladies d'origine fécale, peut être empêchée en retournant assez souvent les tas de compost, afin de soumettre les œufs à la température élevée ainsi obtenue avant qu'ils puissent éclore. L'Agricultural Research Council of Great Britain ²³ a constaté qu'en Angleterre, le nombre des larves de mouches diminue dans une très forte proportion au cours des opérations de compostage. En outre, lorsque la nourriture contenue dans les matières usées organiques subit une certaine décomposition et se rapproche de l'humus, elle cesse d'attirer les mouches.

Au contraire, il est difficile, voire impossible, de lutter contre les mouches, pendant les chaleurs, lorsque la nourriture qu'elles recherchent subit un compostage anaérobie en tas. On obtient de meilleurs résultats, de ce point de vue, si les matières organiques sont digérées en suspension liquide dans des réservoirs clos. Nous reviendrons plus loin en détail sur la lutte contre les mouches (page 87), en particulier dans ses rapports avec les techniques de préparation du compost.

Les expériences qui ont été publiées semblent indiquer que la préparation correcte du compost à partir des matières fécales et autres déchets, si elle se fait dans de bonnes conditions d'hygiène, permet de lutter contre les maladies d'origine fécale si répandues partout où les excréments sont utilisés comme engrais sans précautions sanitaires.

Lorsque des excréta ou des boues d'égout sont mélangées à la masse à composter ; des mesures spéciales doivent être prises pour protéger la santé des ouvriers. Dans certaines régions on a dû abandonner le compostage surtout à cause des odeurs et des conditions d'insalubrité créées par la négligence du contrôle des opérations. Ailleurs, au contraire, on a pu préparer des composts à partir de matières fécales brutes et d'ordures diverses sans constater d'atteintes à la santé des ouvriers ou de gêne sérieuse. En tout cas, il y a lieu de prévoir un matériel de secours suffisant pour éviter l'accumulation des matières usées si un embouteillage se produit.

Aspects agricoles

Les observateurs ont souvent constaté dans diverses régions du monde que, lorsque les effluents urbains sont utilisés comme engrais, la terre est plus fertile au voisinage immédiat des villes qu'à distance, où les matières

usées sont moins abondantes. L'humus provenant des excréta, du fumier, des ordures ménagères et autres matières usées organiques possède des propriétés précieuses pour les végétaux et pour le sol lui-même. Il apporte en effet de l'azote, du phosphore et de la potasse, tous éléments nécessaires à la fertilité du sol. En outre, les déchets contiennent des oligo-éléments indispensables à la croissance optimum des végétaux. Enfin, beaucoup d'autorités estiment que la sensibilité des plantes alimentaires aux parasites et aux maladies infectieuses est exaltée par l'insuffisance de ces oligo-éléments. Ainsi, l'humus peut réduire la fréquence des maladies qui ravagent les cultures.

Outre sa richesse en substances nutritives, l'humus provenant de composts organiques possède diverses propriétés intéressantes. Lorsqu'ils sont employés avec des engrais minéraux, les acides organiques résultant de la décomposition métabolique des substances organiques s'unissent aux phosphates inorganiques. Sous cette forme, le phosphore est plus facilement absorbé par les végétaux supérieurs. D'autre part, l'humus accumule à la fois le phosphore et l'azote dans des conditions qui lui sont propres. La précipitation du phosphore par le calcium est inhibée et l'azote, qui entre dans la composition du protoplasme bactérien, devient insoluble. Puis, lorsque les bactéries meurent et se décomposent, l'azote redevient disponible. L'effet d'ensemble est d'empêcher la fuite de l'azote soluble inorganique dont le taux de dégagement se rapproche ainsi davantage du rythme d'utilisation par les plantes. La décomposition graduelle des substances organiques insolubles permet la libération continue de l'azote sous forme d'ammoniac, qui est ensuite oxydé pour former des nitrites et des nitrates.⁶³ Enfin, l'humus organique peut aussi contribuer à accroître la fixation par le sol de l'azote atmosphérique.

Les effets physiques de l'humus sur le sol sont aussi importants peut-être que ses propriétés nutritives. En effet, la fertilité du sol dépend de sa structure tout autant que de sa composition chimique. Le degré de cohésion des particules qui le composent est très important, car c'est de ce facteur que dépend l'aptitude du sol à retenir l'eau. Plus la cohésion des particules est élevée plus le sol est capable d'absorber l'eau de pluie, par conséquent plus il peut en accumuler, ce qui lui permet de mieux supporter les périodes de faible pluviosité ou de sécheresse. La cohésion des particules du sol est favorisée par les esters celluloseux (acétate de cellulose, cellulose méthylée et cellulose éthylée) qui résultent du métabolisme bactérien⁶²; l'humus joue donc de ce point de vue un rôle utile. En outre, les modifications qu'il produit dans la structure du sol favorisent le développement des racines.

Les terres soumises à une culture intensive ont tendance à s'appauvrir en humus organique, de même que celles des régions tropicales, où les températures élevées accélèrent la destruction biologique des substances organiques. En compensant cette déperdition, on contribue à maintenir

le sol dans les conditions physiques et biologiques nécessaires à la croissance normale des végétaux. La présence de l'humus est particulièrement importante dans les sols constitués par une argile lourde, dans les sols sablonneux meubles et dans les terrains salins et alcalins. L'humus et le métabolisme bactérien dont il est le siège rendent la terre plus apte à amortir par un effet-tampon les changements rapides d'alcalinité et d'acidité et à neutraliser l'action de certains déchets toxiques. D'autre part, la présence d'humus en quantité suffisante atténue l'érosion produite par le vent et par l'eau et permet de cultiver plus facilement les sols trop meubles. La chimie et la microbiologie de l'humus, et ses rapports avec le sol ont été décrits longuement par Waksman,^{83, 84} dont les nombreuses recherches ont fourni des renseignements importants sur les caractéristiques de cette substance dans les divers terrains.

La plupart des méthodes primitives d'utilisation des matières usées comme engrais sont une source permanente d'infection par les germes pathogènes d'origine fécale et ne permettent pas de conserver l'azote dans la proportion nécessaire. Scott⁶⁸ a constaté qu'une quantité considérable d'azote disparaît lors de la préparation et de la dessiccation des matières fécales utilisées comme engrais sous forme d'agglomérés. De même, lorsqu'on dépose sur les champs des matières fécales relativement fraîches et qu'elles demeurent à la surface du sol un certain temps avant d'y pénétrer, leur dessiccation amène une déperdition considérable d'azote. Pire encore, l'emploi de fumier animal comme combustible, qui se perpétue dans certains pays, fait disparaître l'azote complètement. La préparation du compost par les procédés modernes, qui répondent aux exigences de l'hygiène, permet de mieux conserver l'azote que les méthodes plus primitives et insalubres. Avec la méthode la plus sûre du point de vue sanitaire, c'est-à-dire la préparation du compost en aérobiose à des températures élevées, la perte d'azote est minime ; en fait, elle est à peine plus élevée que lorsqu'on prépare le compost en anaérobiose à basse température. Cette question sera traitée plus loin de façon plus complète, à propos des méthodes de préparation.

L'épandage de fumier et autres matières usées qui n'ont pas subi un traitement suffisant favorise la propagation des herbes parasites et autres végétaux indésirables. Au contraire, les températures élevées qui règnent dans un compost en aérobiose détruisent rapidement les graines. On n'obtient pas le même résultat avec l'anaérobiose : au bout de six mois, la quantité de graines fécondes a diminué, mais la destruction n'est pas complète.

Le compostage, outre qu'il permet de traiter de façon salubre les matières usées organiques contaminées, y réduit la proportion carbone-azote (C/N). Cet aspect de la question est traité de manière plus complète à la page 52.

APERÇU HISTORIQUE

Depuis des siècles, agriculteurs et maraîchers ont pratiqué le compostage sous une forme plus ou moins primitive. Les excréta, les détritux végétaux, le fumier animal, les ordures, etc... étaient accumulés en tas ou dans des fosses situés dans un endroit commode, où on les laissait se décomposer tant bien que mal, en attendant que ce matériel fût prêt à servir ou que les agriculteurs fussent prêts à l'utiliser. Ce procédé ne supposait que peu ou pas de contrôle, il exigeait une conservation prolongée avant de donner un humus satisfaisant, son rendement en azote était des plus incertains et son intérêt pour l'assainissement était à coup sûr nul.

Les premiers progrès importants dans la pratique du compostage furent accomplis par Howard^{32, 33, 35} il y a environ trente ans dans l'Inde, où, en collaboration avec Jackson & Wad,⁴² et d'autres,^{4, 17, 30} il mit au point, en systématisant les méthodes traditionnelles, une technique connue sous le nom de « procédé d'Indore », d'après la localité dans laquelle elle fut élaborée. A l'origine ce procédé n'utilisait que du fumier animal ; par la suite, il comporta l'entassement à même le sol de couches alternées de matériaux facilement putrescibles tels que fumier, excréta, boues d'égouts et ordures ménagères, ainsi que de matières organiques relativement stables comme la paille, les feuilles, les détritux urbains et certains déchets d'écuries et d'étables. Le tout était empilé en tas de 1,5 m de haut ou déposé dans des fosses spécialement construites à cet effet et profondes de 0,60 à 0,90 m. Au début on ne retournait qu'à deux reprises pendant la période de compostage, qui était de 6 mois ou davantage ; le liquide s'écoulant de la masse en décomposition était réutilisé pour humidifier le tas, ou était versé sur d'autres tas plus secs. Il est donc probable que ces amas de compost se décomposaient d'abord en aérobie pendant une brève période après la mise en tas et après chaque brassage, puis en anaérobie le reste du temps. Le procédé d'Indore, avec certaines modifications, a été largement utilisé dans l'Inde, par Howard,³³ Acharya¹ et d'autres³⁹. L'Indian Council of Agricultural Research, à Bangalore, a mis au point une variante perfectionnée connue sous le nom de procédé de Bangalore, qu'il a appliquée au cours de vastes programmes de compostage dans l'Inde. Scharff⁶⁶ en Malaisie, Wilson⁹¹ en Afrique orientale et d'autres dans différentes parties du monde^{4, 56, 57, 89, 93, 94} ont utilisé la méthode d'Indore avec quelques changements. Van Vuren⁵¹ en Afrique du Sud a fait des études considérables sur des variantes de la méthode d'Indore et sur l'utilisation du compost comme engrais. Parmi les innovations les plus importantes, il

convient de signaler le retournement plus fréquent qui, en entretenant des conditions favorables aux bactéries aérobies strictes ou facultatives, assure une décomposition plus rapide et permet ainsi d'abréger la période de compostage (voir page 73).

Scott et d'autres entreprirent en 1935 des études très complètes sur le compostage, à l'occasion de travaux relatifs à l'assainissement agricole exécutés dans la Chine du Nord. Leurs travaux ont été interrompus en 1941 par la seconde guerre mondiale, mais heureusement le résultat de ces recherches fut publié en 1951.⁶⁸ Utilisant presque uniquement des excréta, ils ont étudié :

- 1) l'influence sur la santé publique de la récupération des déchets par des méthodes primitives et insalubres ;
- 2) les problèmes sanitaires posés par le rassemblement et le traitement des matières fécales ;
- 3) les pertes de substances chimiques inhérentes aux méthodes primitives d'utilisation des déchets ;
- 4) l'effet de destruction des germes pathogènes que permettent d'obtenir différentes techniques de compostage en aérobiose et en anaérobiose ;
- 5) la récupération d'azote dans les diverses méthodes de compostage et de conservation du compost ;
- 6) la lutte contre les mouches lors des opérations de compostage ;
- 7) les effets produits sur la qualité du compost en faisant varier les proportions des diverses catégories de déchets entrant dans sa composition ;
- 8) l'action du compost sur le rendement des récoltes ;
- 9) les problèmes que pose l'adaptation du compostage aux conditions rencontrées dans les fermes isolées ou dans les villages.

Ces études ont fourni des indications importantes sur les problèmes se rapportant au compostage des matières fécales et des déchets dans les régions rurales.

De 1926 à 1941, Waksman et ses collaborateurs ont fait des recherches fondamentales sur la décomposition aérobie des résidus végétaux et du fumier d'étable. Ils ont publié des données importantes concernant l'influence de la température sur la vitesse de décomposition,⁸⁶ le rôle de groupes séparés de micro-organismes⁸⁵ et l'action de leurs cultures suivant qu'elles sont mixtes ou homogènes.^{85, 87}

Gotaas et ses collaborateurs^{23, 24, 49, 81} ont fait entre 1950 et 1952 des recherches sur certains des aspects fondamentaux du compostage de détritux urbains mélangés contenant des ordures ménagères, avec ou sans adjonction de boues d'égout. Leurs travaux ont permis d'obtenir des précisions essentielles sur l'effet respectif des divers facteurs qui interviennent dans le compostage en aérobiose, à savoir : 1) la température ;

2) l'humidité ; 3) l'aération par retournement ou par d'autres procédés ; 4) le rapport C/N dans les matières organiques ; 5) l'action d'inoculum biologiques spéciaux, et 6) le broyage ou la lacération des matériaux. Leurs études ont aussi fourni des données sur les types d'organismes qui se développent au cours du compostage, sur les techniques permettant d'apprécier l'état du compost pendant et après la préparation, sur la conductibilité thermique des matériaux constitutifs du compost et sur diverses questions touchant au mode opératoire.

Pendant que les méthodes anciennes faisaient l'objet de divers perfectionnements dans l'Inde, en Chine, en Malaisie et ailleurs, d'autres chercheurs, notamment en Europe, consacraient des efforts considérables à la mécanisation des opérations de compostage, notamment afin de traiter et d'évacuer les ordures et détritux urbains sans risque d'insalubrité. Ces efforts aboutirent à différentes innovations mécaniques, dont la plupart visaient soit à améliorer l'aspect extérieur du compost en opérant en milieu clos, soit à accélérer le processus et à en diminuer le coût.

Ces perfectionnements techniques sont principalement destinés aux villes, mais ils sont également intéressants pour le compostage en milieu rural.

Parmi les premiers procédés brevetés, l'un des plus largement utilisés ^{11, 18, 36, 60, 78} a été mis au point par Beccari,⁷ de Florence, et porte le nom de son inventeur. Dans cette méthode, qui utilisait un premier stade de fermentation anaérobie suivie d'une phase finale en aérobiose, le matériel était entassé dans une cuve fermée pour empêcher le dégagement des odeurs fétides qu'entraîne la putréfaction des matières organiques. Dans sa forme première, la cuve de Beccari comprenait un compartiment unique avec une trappe de chargement au sommet et une porte de déchargement sur le devant. Des trous d'aération, que l'on ouvrait à la phase finale, permettaient d'assurer des conditions d'aérobiose partielle. Une modification du procédé Beccari, qui consiste à remettre en circulation l'effluent liquide ou les gaz et permet peut-être une meilleure aération, est connue sous le nom de procédé Verdier.

Bordas⁷⁷ apporta en 1931 un nouveau perfectionnement au procédé Beccari en s'efforçant d'éliminer la phase anaérobie par l'introduction d'air sous pression dans un réservoir de fermentation au moyen d'une conduite centrale et de conduites murales. Une grille partage le réservoir en une chambre inférieure et une chambre supérieure. Le principe est d'obtenir des fournées successives et, pour utiliser l'espace au maximum, de faire tomber la charge dans la chambre inférieure à travers la grille quand son volume a été considérablement réduit par la décomposition.

Earp-Thomas, de Hampton (New Jersey), a pris en 1939 un brevet pour un digesteur à grilles multiples.

Un brassage par socs rotatifs et l'introduction d'air sous pression, permettent d'obtenir un compost en aérobiose. Une des caractéristiques

essentielles de ce procédé est l'utilisation de cultures bactériennes spéciales fournies par Earp-Thomas.

Une variante de la cuve fermée du type digesteur, consiste en un réservoir à parois doubles et à compartiments horizontaux multiples. Il a été récemment mis au point par la Ralph W. Kiker Company, de Lansing (Michigan). Les matières organiques sont contenues dans la partie intérieure du réservoir, qui est aérée à la fois par l'intérieur et par l'extérieur et constamment arrosée par l'effluent liquide pompé à partir d'un puisard collecteur. D'après les indications fournies, il semble que ce procédé utilise un inoculum spécial.

Le procédé Frazer,¹⁹ qui a été breveté aux Etats-Unis en 1949, utilise un digesteur clos ventilé et entièrement mécanisé dans lequel la matière organique dilacérée est continuellement brassée à mesure qu'elle descend et mise en contact avec les gaz de décomposition. Ce dernier point est une des caractéristiques principales du brevet. Le compost est passé au crible à sa sortie du compartiment inférieur, et les résidus du criblage sont réintroduits dans le circuit.

Le digesteur Hardy est une grande cuve circulaire à l'intérieur de laquelle des vis sans fin verticales assurent l'aération et le brassage des matériaux. Le fond de la cuve est poreux pour permettre l'entrée de l'air et l'écoulement de l'effluent. Cette cuve malaxeuse, dans laquelle s'effectue la décomposition aérobie, fonctionne de manière continue et décharge le compost fini au fur et à mesure de l'introduction de la matière brute. Il existe d'autres digesteurs brevetés, avec différents dispositifs d'aération et de déplacement des matériaux.

Snell⁷¹ a fait des études expérimentales sur le compostage dans un digesteur à brassage mécanique. Il ressort de ses rapports que des efforts considérables ont été faits pour mettre au point des procédés plus efficaces d'agitation et pour résoudre certains problèmes mécaniques se rapportant au fonctionnement du digesteur.

Il semble que les digesteurs aient été principalement utilisés dans de petites installations pour le traitement d'ordures ménagères triées ayant une teneur élevée en matières organiques. Ils sont fortement mécanisés en vue d'assurer l'aération continue et les températures élevées qui y règnent accélèrent le compostage. La rapidité des opérations permet de réduire le volume des installations et la superficie du terrain, mais l'avantage économique qui en résulte est moindre qu'on ne le pense parfois ; en effet, le compost fini est utilisé à un rythme saisonnier alors que la matière première du compostage arrive de manière plus ou moins régulière. D'autre part, on peut se demander si le compostage d'ordures ménagères triées est vraiment un procédé économiquement justifié. En effet, les ordures contenant une forte proportion de déchets d'aliments peuvent être cuites et servir de façon rentable à la nourriture des porcs. En outre, leur compostage entraîne une perte d'azote très considérable puisque ces matières ont un rapport C/N assez bas. En sens contraire, on peut arguer que, si l'on

composte des ordures mélangées avec des déchets organiques en une masse de rapport C/N plus élevé, on accroît le temps nécessaire pour ramener ce rapport à 20 : cette considération n'est pas sans importance du point de vue économique lorsqu'on utilise des digesteurs mécanisés.

Le premier procédé Dano, mis au point au Danemark, est en général considéré comme une méthode de compostage, mais en fait, il se ramène à une opération de triage et de broyage des déchets, dont le produit peut ensuite servir à la fabrication de compost selon l'une quelconque des méthodes connues. Les ordures et les déchets sont introduits dans un cylindre rotatif à mouvement lent, dont l'axe est légèrement incliné par rapport à l'horizontale, et où les matériaux sont aérés pour éliminer les odeurs désagréables, puis mélangés et partiellement réduits en morceaux plus petits. Les métaux ferreux et autres matières récupérables sont éliminés au moyen d'un séparateur magnétique et par triage manuel au cours de leur acheminement vers un appareil de broyage et d'homogénéisation appelé Egsetor. Le broyage en particules de dimensions voulues s'effectue par frottement entre les fragments d'ordures et entre ceux-ci et les parois rugueuses de l'Egsetor en rotation. Il faut 4 à 6 heures environ pour le passage des matériaux à travers le broyeur. Le compostage s'effectue finalement en tas disposés à même le sol et hauts de 1,5 à 1,8 m.

La Dano Corporation¹⁵ a récemment construit un digesteur mécanique appelé *Bio-stabilizer*, qui a été utilisé dans une usine-pilote assurant le compostage d'environ 20 tonnes de déchets par jour. Le *Bio-stabilizer* consiste essentiellement en un long cylindre, à peu près semblable à un four à ciment, qui tourne lentement (à raison d'un tour toutes les 5 minutes) sur un axe légèrement incliné par rapport à l'horizontale. Les déchets, avec ou sans addition de boue d'égout, sont introduits dans le digesteur, qui peut en contenir environ 100 tonnes et qui est maintenu à peu près plein. La rotation du cylindre entraîne une lente progression des déchets. On peut ajouter de l'eau pour accroître le degré d'humidité. L'aération est assurée par deux rangées de tuyères fixées le long du cylindre. La désintégration des déchets est obtenue par l'abrasion des particules en rotation et par une action biologique. Suivant leur nature, les détritiques restent dans le digesteur de trois à cinq jours, et leur température reste à peu près constamment à un niveau favorable aux bactéries thermophiles. À la sortie de l'appareil, le compost passe à travers un tamis à mailles de 1 cm et, s'il y a lieu, il est encore soumis à une stabilisation supplémentaire par conservation en tas avant d'être préparé pour la vente. Un petit *Bio-stabilizer* fonctionne à Rüsclikon, près de Zurich (Suisse), et un plus grand est actuellement en construction à Edimbourg. Une installation expérimentale doit être montée près de Los Angeles (Californie).

La méthode VAM^{83, 96} est utilisée aux Pays-Bas depuis 1932 par la N. V. Vuilafvoer Maatschappij (VAM), entreprise non commerciale créée par le Gouvernement pour l'évacuation des ordures urbaines. Dans son

principe, c'est une adaptation du procédé d'Indore pour le compostage de grandes quantités de détritiques urbains, ne contenant qu'une faible proportion d'ordures ménagères ou de déchets alimentaires facilement putrescibles. A l'origine, ce procédé consistait à empiler les déchets non broyés. Les piles, allongées et élevées, étaient aspergées périodiquement avec leur propre effluent. Les matières décomposées étaient ensuite broyées au moyen d'un pilon et vendues comme humus. Dans les installations plus récentes, les déchets sont préalablement dilacérés dans un broyeur spécial mis au point par le directeur de la VAM, M. Westrate.⁹⁰ Ce broyeur a la forme d'une roue sans jante. Les rayons de fer en U sont articulés par des broches à un moyeu et tournent au-dessus d'une base horizontale de 4,5 m ou plus de diamètre. Cette base est constituée par une série alternée de plaques rugueuses et de cribles. Le broyage s'effectue par la rotation des rayons qui raclent les plaques rugueuses. Les matières récupérables sont triées et écartées avant le début de l'opération ; les matières non broyables sont enlevées deux fois par jour. Les produits du broyage passent à travers les cribles et tombent sur un tapis roulant qui les amène à un emplacement où ils peuvent être facilement arrosés en vue d'en contrôler l'humidité, et retournés de temps à autre pour assurer l'aération pendant le compostage.

Stovroff et ses collaborateurs de la Compost Corporation of America,^{74, 75} qui ont fait fonctionner d'importantes installations-pilotes, ont étudié la rentabilité de la préparation d'engrais par compostage de détritiques urbains et de déchets industriels provenant de collectivités importantes. Ces usines-pilotes sont dotées d'un équipement moderne de manutention qui permet de traiter les masses considérables de déchets que les villes évacuent journellement. La mécanisation est avantageuse car elle permet de vendre le compost en gros à des prix qui demeurent inférieurs à ceux des fumiers d'étable ou de basse-cour.

L'usine dont la construction est envisagée à Oakland (Californie) par une compagnie privée est prévue pour composter un mélange de 300 tonnes d'ordures ménagères et de détritiques urbains par journée de travail de 8 heures, ou 600 tonnes sur la base de deux équipes fonctionnant au total 16 heures par jour. Le traitement est entièrement aérobie et le compost est disposé en silos régulièrement espacés. Il s'agit en fait de la technique d'Indore, perfectionnée par l'application de méthodes modernes de mécanisation.

L'installation est à débit continu. Le cycle commence sur une vaste aire de réception en béton où les ordures sont chargées sur des bandes transporteuses. Les éléments inorganiques et non compostables sont éliminés en plusieurs phases qui font intervenir un appareillage mécanique, pneumatique et magnétique, une centrifugation, et enfin un contrôle manuel. Les matériaux ainsi récupérés sont traités pour revente à l'industrie. L'équipement et les opérations sont conçus de manière à entretenir dans les tas en fermentation des conditions favorables à l'action biologique souhaitée.

Le compostage exige approximativement trois semaines, pendant lesquelles l'humidité, l'aération et la température sont contrôlées. Quand le compost est stabilisé, les tas sont réunis en grosses meules de stockage ou soumis à une préparation finale pour la vente. Cette préparation consiste à tamiser le matériel pour le rendre homogène avant l'expédition en vrac par camions, ou à ajouter des substances chimiques et à mettre en sacs. L'importance de ce traitement final dépend de l'état du marché, de la saison et de l'usage auquel le produit est destiné.

Il peut être utile d'indiquer, à la fin de cet aperçu historique, quelques-unes des nombreuses régions où les diverses méthodes sont appliquées en grand pour traiter les ordures évacuées par des villes importantes. Lorsqu'il existe un réseau d'égouts, il est fréquent que les excréments ou les boues soient mis à composter avec les ordures ménagères et les détritiques mais cette pratique n'est pas répandue partout. Dans certaines localités, les boues d'égouts sont mêlées à d'autres déchets organiques utilisés pour le compostage, mais en règle générale elles sont digérées en anaérobiose et répandues sur la terre sans autre traitement que la déshydratation.

Le procédé Beccari est utilisé dans plus de 50 villes d'Italie et de France pour le traitement des ordures ménagères, et le procédé Verdier est employé dans plusieurs villes du midi de la France. Des installations de broyage du type Dano, qui accumulent le matériel sur place ou sur des terrains spéciaux en vue du compostage, sont en service dans plusieurs villes du Danemark et de la Suède. Dans certaines de ces installations, des boues d'égouts ou des excréta sont mélangés aux déchets au moment où ceux-ci sortent du broyeur pour être mis à composter.

Diverses variantes du procédé d'Indore sont appliquées aux Pays-Bas, en Allemagne, en Autriche, en Angleterre, en Afrique, en Australie, en Nouvelle-Zélande, dans l'Inde, en Malaisie, en Amérique centrale et aux États-Unis.

Les Pays-Bas sont le pays d'Europe où les opérations de compostage ont le plus d'envergure ; des milliers de tonnes de compost y sont produites chaque année à partir des ordures urbaines par la VAM ainsi que par diverses municipalités, pour être vendues aux agriculteurs.⁸⁹ Les ordures et déchets de La Haye, de Groningue et de Zandvoort sont transportés dans des wagons de chemin de fer spécialement aménagés jusqu'au lieu de décharge à Wijster ; là, les trains sont alors dirigés sur un des viaducs, hauts de 6 mètres et longs de 488 mètres. Le contenu des wagons est enfin déversé pour former au-dessous des viaducs des couches qui sont nivelées mécaniquement et aspergées d'eau. Le compostage exige 4 à 8 mois, après quoi le matériel est pulvérisé et passé au crible. Il est probable que la décomposition, aérobie au début, devient ensuite anaérobie. A Schiedam, à Flessingue⁹⁰ et dans d'autres villes, les détritiques contenant de faibles quantités d'ordures ménagères sont broyés et disposés en tas, que l'on retourne pour les aérer. Dans ces installations, la durée du compostage

varie de trois mois pour les ordures d'été à deux mois pour les ordures d'hiver, qui contiennent une quantité considérable de cendres.

Une nouvelle usine de compostage munie d'un équipement mécanique de manutention fonctionne en Allemagne à Baden-Baden. Les ordures sont d'abord triées par criblage, par élimination magnétique des métaux, et par enlèvement manuel ; elles sont ensuite mélangées à des boues d'égout digérées pour être compostées en silos. Après 4 ou 6 mois de décomposition, le compost est tamisé et les parcelles volumineuses sont pulvérisées dans un broyeur à marteaux. D'autres villes allemandes construisent ou envisagent des installations municipales de compostage. A Heidelberg, on vient d'ouvrir une usine utilisant le broyeur VAM et fabriquant le compost à l'air libre en silos.

A Londres, l'arrondissement (*Borough*) de Southwark fabrique des composts depuis 1906, en utilisant les balayures des rues, les déchets des marchés, le fumier animal et les ordures ménagères.⁵¹ La méthode est une variante de la technique d'Indore qui emploie des cuves de béton d'une contenance de 70 tonnes. Les municipalités de Leatherhead, Maidenhead et Dumfries, ainsi que les Northern Sewage Outfall Works du Comté de Londres, pratiquent de même le compostage des boues d'égout, des détritits urbains et des ordures ménagères.^{51, 94} L'usine de Dumfries recueille les ordures de plusieurs petites villes, les traite et vend le compost obtenu. Le compostage s'effectue dans des cuves en béton qui sont aérées afin d'obtenir une décomposition à haute température. Le matériel est placé dans les cuves et arrosé avec de l'effluent liquide d'égout qui laisse un dépôt de boue sur les ordures lorsque la majeure partie de l'eau s'est écoulée. Les manutentions s'effectuent mécaniquement. Des études sont en cours dans l'île de Jersey, pour la création d'une usine-pilote de compostage. On envisage de construire un digesteur capable de traiter en 7 jours un mélange d'ordures et de boues d'égout qui serait ensuite conservé en tas pendant une période de maturation de 8 à 10 semaines.

Dans plusieurs parties de l'Afrique, notamment dans l'Union Sud-Africaine et au Kenya, la production de composts suivant diverses variantes du procédé d'Indore, dépasse 380 000 m³ par an.⁸² Il ressort d'une enquête récente que 14 municipalités de la Province du Cap fabriquent du compost.⁶⁰ Le procédé s'implante également dans les régions rurales, où les détritits, les débris végétaux et le fumier sont récupérés en petites quantités, et généralement avec des moyens assez primitifs, soit par les agriculteurs, pour qui le maintien de la fertilité du sol est une nécessité économique, soit par les jardiniers amateurs.

En Amérique centrale, le Gouvernement de Costa Rica a créé une société chargée d'organiser les travaux de compostage dans les centres urbains. Au Salvador, des entreprises privées se chargent avec profit de ce travail dans les villes de Santa Ana et de San Salvador. Les déchets sont triés, broyés, malaxés avec de la boue d'égout et des détritits d'abat-

toirs, amoncelés en tas et retournés. Il faut cinq à six semaines pour obtenir le compost fini.

Au Mexique, il existe plusieurs installations-pilotes qui préparent la voie à des opérations plus vastes ; elles utilisent la méthode des tas périodiquement retournés. De même, en Nouvelle-Zélande, des installations-pilotes fonctionnent et d'importantes recherches sont en cours sous la direction d'un comité inter-ministériel.

Aux Etats-Unis, où l'on ne s'était pas beaucoup intéressé jusqu'ici au compostage des ordures urbaines, plusieurs villes ont reconnu récemment les avantages que ce procédé peut procurer en permettant d'évacuer les ordures à frais réduits. Ce manque d'intérêt était dû en partie au fait que certains des procédés brevetés qui avaient été proposés, sans avoir jamais été poussés jusqu'au stade de l'application pratique, paraissaient techniquement et économiquement douteux, exigeaient des installations compliquées et coûteuses, et nécessitaient l'obtention d'une licence ou le paiement de redevances. Cinq usines employant le procédé Beccari ont été créées aux environs de 1930, mais toutes furent abandonnées par la suite.⁷⁷ Depuis quelque temps, une petite installation gérée par la Compagnie Frazer Products Inc. à Bayshore (Long Island) fabrique du compost à partir d'ordures ménagères triées avec adjonction de 25 % de boue d'égout.

C'est probablement dans l'Inde que le compostage, pratiqué en vue du traitement et de la récupération des déchets, a pris le plus d'extension ; le nombre de municipalités où le procédé est appliqué est passé de 260 en 1944/45 à 1609 en 1951, et la production annuelle s'est élevée pendant la même période de 182 610 à plus de 2 millions de tonnes.^{1, 40} Près de 138 000 villages traitent leurs ordures et déchets par le procédé de Bangalore.

D'une façon générale, il semble que le compostage, considéré comme un moyen économique d'évacuation et de récupération des déchets organiques, suscite un intérêt considérable dans les régions les plus diverses. L'auteur a eu connaissance de différents projets actuellement à l'étude dans plusieurs localités qui n'ont pas été mentionnées ici.

Peu d'indications nouvelles ont été apportées, depuis la mise au point du procédé Beccari, sur l'utilisation de la digestion anaérobie en tas des ordures ménagères, des déchets et des excréta. Ces méthodes, produisant des températures plus basses, entraînent sans doute une moindre déperdition d'azote, mais le dégagement d'odeurs fétides, le pullulement des mouches et la destruction moins complète des germes pathogènes constituent des inconvénients majeurs.

Il existe une volumineuse littérature sur les méthodes de traitement en suspension liquide pour la digestion anaérobie des boues d'égouts et des déchets industriels. Ces procédés ont fait l'objet de travaux et développements trop nombreux pour pouvoir être exposés en détail ici ; il est

possible, néanmoins, d'indiquer de quelle façon ils peuvent être adaptés aux besoins des entreprises agricoles et des petits villages. Etant donné, d'une part, que les exploitations agricoles produisent de grandes quantités de matières contenant du carbone, et notamment des fumiers qui ont en outre une forte teneur en azote, et que, d'autre part, la digestion anaérobie de ces matières dégage du méthane, on voit les intéressantes possibilités qu'offrent des digesteurs conçus de telle sorte que le gaz puisse être recueilli pour servir à la production de chaleur ou d'énergie, et que l'humus obtenu puisse être utilisé comme engrais. Des progrès considérables ont été accomplis dans cette voie, en particulier en France, en Allemagne, en Italie et dans l'Inde, où des installations de ce type fonctionnent depuis quelque temps déjà.^{37, 52, 54} Cette méthode a reçu une grande extension en France, où l'on comptait 600 installations individuelles en 1950, et plus de 1000 en 1952. L'industrie française livre des réservoirs et des gazomètres préfabriqués d'un modèle simple. Ces installations, qui seront décrites de façon plus complète au chapitre 9, peuvent rendre de grands services dans les régions à la fois pauvres en combustible et en engrais.

VOLUME ET COMPOSITION DES MATIÈRES BRUTES UTILISÉES

La quantité, la nature et la composition des matières usées pouvant servir au compostage varient considérablement selon le lieu et la saison. Dans les villages et les fermes, ces caractéristiques dépendent du climat, du nombre des personnes, de l'étendue de l'exploitation, des types de culture, des animaux utilisés et de leur stabulation, des possibilités matérielles de collecte des ordures, des coutumes sociales et des habitudes alimentaires, de l'emploi des déchets organiques comme combustible et des conditions économiques de la région. Dans les villes et les zones urbaines, la plupart de ces facteurs interviennent également, mais il faut en ajouter d'autres : présence de déchets industriels, de débris provenant de l'entretien des parcs et des pelouses, de balayures des rues et de cendres ; utilisation d'incinérateurs dans les habitations et les entreprises commerciales ; fréquence et modalités du ramassage des ordures (en vrac ou par catégories) ;^a abondance des matières récupérées ; utilisation des issues pour la nourriture des animaux et emploi par les particuliers de broyeurs d'ordures.

Ces facteurs sont si multiples et complexes qu'on ne saurait établir de règles uniformes ou de méthodes passe-partout pour calculer la quantité de matières usées que l'on peut s'attendre à trouver dans une localité donnée. Pour évaluer l'importance et la composition des ordures provenant d'une population déterminée, il faut, soit faire une étude spéciale de la localité, soit se servir des renseignements obtenus dans des collectivités présentant des caractéristiques similaires. Il existe, toutefois, certaines données essentielles qui peuvent faciliter l'analyse d'une opération déterminée de compostage en complétant les informations obtenues sur place.

Zones rurales et villages agricoles

Dans les zones rurales et les villages agricoles où il n'existe pas de canalisation d'égouts et où les excréta sont conservés, les indications qualitatives et quantitatives suivantes pourront servir de point de repère général pour l'analyse d'une opération de compostage.

^a Nous englobons ici dans le terme d'« ordures » les déchets de cuisine, les détritiques combustibles ou non, les vieux papiers et autres rebuts qui sont habituellement récoltés lors du ramassage en vrac des matières usées urbaines : les boues d'égouts, les excréta et les déchets industriels ne sont pas compris dans ces « ordures ».

*Excreta humains sans urines (Fèces)**Quantité approximative*

135-270 g par habitant et par jour (avant déshydratation)

35-70 g par habitant et par jour (après déshydratation)

Composition approximative

	%
Eau	66-80
Matières organiques (après déshydratation) ^a	88-97
Azote	5,0-7,0
Phosphore (exprimé en P_2O_5)	3,0-5,4
Potassium (exprimé en K_2O)	1,0-2,5
Carbone	40-55
Calcium (exprimé en CaO)	4-5
Rapport C/N	5-10

*Urine humaine**Quantité approximative*

Volume : 1,0-1,3 litre par habitant et par jour

Matières solides : 50-70 g par habitant et par jour

Composition approximative

	%
Eau	93-96
Matières organiques (après déshydratation)	65-85
Azote	15-19
Phosphore (exprimé en P_2O_5)	2,5-5
Potassium (exprimé en K_2O)	3,0-4,5
Carbone	11-17
Calcium (exprimé en CaO)	4,5-6

Fumier animal

Quantité approximative. La quantité de fumier diffère considérablement selon la nourriture et le mode de logement des animaux. Van Slyke (cité par Millar & Turk ⁵⁵) donne, sur la production d'excreta, les informations qui figurent dans le tableau 1 ; à ces chiffres, il convient d'ajouter le poids de la paille, de la litière et des détritrus qui entrent dans la composition totale du fumier.

Mignotte ⁵⁴ donne les évaluations suivantes de la quantité de fumier produite annuellement par divers animaux : chevaux et bœufs de trait, 10 tonnes métriques ; bœufs (de boucherie), 15 tonnes, vaches laitières, 12 tonnes ; moutons, 0,5 tonne ; porcs, 1,5 tonne.

^a Dans la présente monographie, la quantité de matières organiques a été calculée sur la base de la perte de poids après incinération du produit sec.

TABLEAU 1. QUANTITÉS D'EXCRETA D'ORIGINE ANIMALE

Animaux	Nombre de tonnes par an, pour 100 kg de poids vif	Quantité d'azote (nombre de kg par an, pour 1000 kg de poids vivant		
		liquide	solide	total
Chevaux	1,80	5,4	8,8	14,2
Vaches	2,70	4,8	4,9	9,7
Porcs	3,06	4,0	3,6	7,6
Moutons	1,26	9,9	10,7	20,6
Volaille	0,86	—	20,0	20,0

Reproduit d'après *Fertilizers and Crop Production* de Van Slyke (cité par Millar & Turk ⁵⁵).

La quantité annuelle d'azote évacué a été estimée par divers auteurs à environ 9 kg pour les chevaux et les bœufs, 7 kg pour les vaches ; et 5,6 kg pour les ovins et les caprins.

Composition approximative. Le fumier provenant des écuries et des étables contient les trois principaux éléments suivants : a) litière et détritux végétaux ; b) excreta solides et c) urines. Les caractéristiques et l'importance relative de ces composants varient considérablement suivant les animaux, leur alimentation, leur destination et la façon dont les étables sont agencées. La paille et les résidus végétaux utilisés pour les litières contiennent habituellement des quantités importantes de carbone, en particulier sous forme de cellulose, ainsi que de faibles quantités d'azote et de minéraux. Les excreta solides contiennent des quantités importantes de protéines qui fournissent un milieu nutritif mieux équilibré pour la croissance des microorganismes. Le tableau 2 donne, d'après Waksman,⁸⁴ les proportions de certains des éléments chimiques entrant dans la composition des différents fumiers frais.

TABLEAU 2. COMPOSITION CHIMIQUE DE DIFFÉRENTS FUMIERS FRAIS *

Composition chimique	Mouton ^a	Cheval ^b	Vache ^a
	%	%	%
Substances solubles dans l'éther	2,8	1,9	2,8
Matières organiques solubles dans l'eau froide	19,2	3,2	5,0
Matières organiques solubles dans l'eau chaude	5,7	2,4	5,3
Hemicelluloses	18,5	23,5	18,6
Cellulose	18,7	27,5	25,2
Lignine	20,7	14,2	20,2
Protéines totales	25,5	6,8	14,9
Cendres	17,2	9,1	13,0

* Excreta solides uniquement

^a Calculée sur le fumier déshydraté après élimination des détritux.

^b Excreta solides et liquides

Reproduit d'après Waksman,⁸⁴ avec l'autorisation de John Wiley & Sons, Inc., New York.

Le tableau 3 montre, d'après Jenkins,⁴⁴ la nature chimique des divers types de fumiers.

TABLEAU 3. NATURE CHIMIQUE DES DIVERS TYPES DE FUMIERS

Types de fumiers	Eau %	Composition du produit sec		
		Azote %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %
Bovins	80	1,67	1,11	0,56
Chevaux	75	2,29	1,25	1,38
Ovins	68	3,75	1,87	1,25
Porcins	82	3,75	3,13	2,50
Poules	56	6,27	5,92	3,27
Pigeons	52	5,68	5,74	3,23

Reproduit d'après Waksman,⁸⁴ avec l'autorisation de John Wiley & Sons, Inc., New York

Il ressort de nombreuses analyses^{68, 84} que le fumier des écuries et des étables contient, à l'état frais, environ 70-80 % d'eau, 0,03-1,9 % d'azote, 0,1-0,6 % de phosphore (exprimé en P₂O₅) et 0,3-1,2 % de potassium (exprimé en K₂O). Une tonne de fumier frais contient donc environ 180 à 270 kg de matière sèche, approximativement 3,5-5 kg d'azote, 2 à 3 kg de P₂O₅ et 4 à 5 kg de potassium. Au cours du compostage du fumier, le degré d'humidité et la quantité de matière sèche diminuent beaucoup, mais la plupart des éléments nutritifs peuvent être conservés dans le produit fini.

Il convient de signaler que les urines humaines ou animales ont une teneur en azote largement supérieure à celle des matières fécales. Une politique rationnelle de récupération suppose donc qu'on s'efforce tout particulièrement de ne pas les laisser perdre. On peut les absorber en utilisant pour les litières et dans les fosses à purin de la paille, de la sciure et d'autres déchets celluloseux.

Ordures (ordures ménagères, déchets et autres rebuts)

Quantité approximative. Les quantités d'ordures ménagères, de déchets organiques et de matière végétale morte dont on dispose dans les villages et les exploitations agricoles pour la fabrication du compost sont extrêmement variables. Les ordures ménagères et les déchets de cuisine servent en majeure partie à l'alimentation des animaux et il ne reste donc que des quantités très limitées de produits végétaux non comestibles riches en cellulose. On trouve de même fort peu de vieux papiers, chiffons, etc. La grande masse est constituée par des cendres, surtout dans les régions froides, les balayures de rues et des rebuts divers. Dans les régions chaudes à pluies abondantes, les débris de plantes entrent pour une forte proportion dans la composition des ordures ; celles-ci sont toutefois en quantité

insuffisante dans de nombreux villages pour fournir une matière à composter satisfaisante après mélange avec les excréments, et il est nécessaire de la compléter en y ajoutant du fumier. Bien qu'elle varie considérablement d'un endroit à l'autre, la quantité d'ordures ménagères et de déchets rejetés dans les villages peut être évaluée à environ 220-340 g par habitant et par jour.

Composition approximative

	%
Eau	10-60
Matières organiques (après déshydratation)	25-35
Azote	0,4-0,8
Phosphore (exprimé en P_2O_5)	0,2-0,5
Potassium (exprimé en K_2O)	0,8-1,5
Carbone	12-17
Calcium (exprimé en CaO)	4,0-7,5

Déchets des abattoirs

Quantité approximative. Ces déchets sont en quantité extrêmement variable suivant qu'on prépare plus ou moins de sous-produits. On estime que les petits abattoirs où la récupération est nulle donnent jusqu'à 22-36 kg de matières compostables (poids sec) par tonne de viande débitée ; dans les grands abattoirs qui utilisent la majeure partie des déchets pour la fabrication de sous-produits, la quantité pouvant servir au compostage ne dépasse pas 11 à 18 kg par tonne. Les proportions de matières usées liquides et solides varient également selon les abattoirs. Dans les grandes installations modernes, les matières usées se présentent sous forme d'effluent liquide.

Composition approximative. La composition varie elle aussi selon l'ampleur des opérations et l'importance du traitement des déchets pour la fabrication de sous-produits. La plupart des abattoirs ruraux n'emploient que des procédés rudimentaires de récupération et leurs déchets comprennent du sang, des viandes impropres à la consommation, des tripes, des abats, des contenus intestinaux, des sabots, etc. ; la composition est en général la suivante :

	%
Eau	75-80
Matières organiques (après déshydratation)	80-95
Azote	8-11
Phosphore (exprimé en P_2O_5)	3,0-3,5
Potassium (exprimé en K_2O)	2,0-2,5
Carbone	14-17
Calcium (exprimé en CaO)	3,0-3,5

Agglomérations urbaines

Dans les agglomérations urbaines, la quantité et la composition des matières usées varient presque autant que dans les zones rurales. Des données nombreuses ont toutefois été publiées à ce sujet pour des villes situées dans différentes régions du monde. On trouvera ci-après certaines indications générales relatives à des villes possédant des réseaux d'égouts et dans lesquelles la collecte des ordures ménagères et des déchets est régulièrement effectuée ; ces renseignements peuvent faciliter l'analyse des opérations urbaines de compostage en complétant les informations obtenues localement.

Boues d'égouts

Le tableau 4 indique approximativement la quantité et la composition du contenu solide et de la boue des égouts selon les diverses méthodes de traitement utilisées. Dans la préparation du compost, les boues d'égouts, fraîches ou digérées, peuvent être utilement mélangées avec des ordures ménagères et d'autres déchets. Lorsque la boue d'égouts n'a pas été partiellement égouttée, il est nécessaire, comme on le montrera plus loin, d'y ajouter des quantités considérables de matières usées sèches, afin d'absorber l'eau et de créer des conditions d'aérobiose.

Déchets industriels

La quantité et la composition des déchets industriels pouvant servir à la fabrication de compost varient considérablement et doivent être évaluées dans chaque cas particulier d'après les renseignements disponibles sur les industries de la région. Les déchets des industries alimentaires — détritiques végétaux, plumes, résidus d'abattoirs — peuvent fournir des quantités importantes de matières solides ou semi-solides pour le compostage. La sciure et les copeaux de bois provenant des scieries, et dont la teneur en eau est habituellement de 40 à 65 %, sont également intéressants, surtout lorsqu'ils sont mélangés à des matières riches en azote telles que les boues d'égouts, les excréta ou les déchets des abattoirs. Des matières usées liquides d'origine industrielle, comme celles qui proviennent des laiteries, brasseries, etc., sont souvent présentes dans les eaux d'égouts et influent sur la quantité et la composition des boues.

Ordures (ordures ménagères, déchets et autres rebuts)

Les quantités utilisables d'ordures ménagères et de déchets alimentaires dépendent du climat, des moyens disponibles pour la conservation des aliments, des habitudes alimentaires, de l'utilisation des ordures ménagères pour l'alimentation du bétail, de l'emploi de broyeurs domestiques d'ordures et de la situation économique de la collectivité. Ces ordures ménagères

TABLEAU 4. DONNÉES APPROXIMATIVES SUR LA QUANTITÉ DES EAUX ET DES BOUES D'ÉGOUTS ET SUR LEUR COMPOSITION

	Quantité de matières solides (sèches) par habitant et par jour (grammes)	Boues liquides (pourcentage de solides)	Dépôt dans les bassins de sédimentation (pourcentage de solides)	Dépôt dans les filtres à vide (pourcentage de solides)	Composition du produit sec (%)				
					Matières organiques	Matières minérales	Azote (N)	Phosphate (P ₂ O ₅)	Potasse (K ₂ O)
1. Eaux vannes domestiques, fraîches	82-100	0,04-0,15	—	—	60-85	15-40	5,0-10,0	2,5-4,5	3,0-4,5
2. Contenu d'une fosse Imhoff bien digéré	23-36	8,0-12,0	35-50	—	30-45	55-70	2,0-3,0	1,2-3,5	0,1-0,5
3. Boues brutes, fraîches	45-64	2,5-5,0	28-45	22-34	60-80	20-35	1,5-4,0	0,8-4,0	0,1-0,5
4. Boues brutes, digérées	27-41	5,0-12,0	35-50	26-34	35-60	40-65	1,0-3,5	1,2-4,0	0,1-0,5
5. Boues brutes et humus resté dans les filtres (frais)	59-77	3,5-6,5	26-40	23-34	50-75	25-50	2,0-4,5	0,8-3,6	0,1-0,5
6. Matières brutes et humus resté dans les filtres (digéré)	36-50	5,0-12,0	35-50	25-35	35-60	40-65	1,0-3,5	1,0-3,8	0,1-0,5
7. Boues brutes et activées, fraîches	73-91	3,0-6,0	26-40	20-24	50-80	20-50	2,3-5,2	1,2-4,0	0,2-0,6
8. Boues brutes et activées, digérées	45-104	4,5-8,5	28-50	22-26	35-55	45-65	2,0-4,8	1,3-4,0	0,2-0,6
9. Boues brutes digérées et boues activées, fraîches	54-73	2,5-4,5	28-45	20-24	40-60	40-60	2,2-5,0	1,3-4,0	0,3-0,8

d'origine commerciale ou domestique, qui se composent principalement de déchets de cuisine et d'épluchures de légumes, varient en quantité de 90 à 400 g par habitant et par jour et contiennent 60 à 85 % d'eau et 65 à 85 % de matières organiques après déshydratation. Dans quelques villes, on enregistre jusqu'à 600 g par habitant et par jour ; la quantité se situe entre 90 et 270 g quand il n'y a pas de gaspillage excessif des denrées alimentaires et que les possibilités de réfrigération sont bonnes. Le poids de ces ordures ménagères est de 460 à 590 kg par m³.

La quantité de résidus combustibles dépend de la situation économique de la ville, de l'emploi d'incinérateurs privés dans les immeubles, de la densité de la population, de l'ampleur des récupérations et de l'importance du jardinage domestique. En règle générale, la quantité varie entre 0,1 et 1,3 kg par habitant et par jour, avec une teneur en eau de 35 à 60 % et 55 à 80 % de matières organiques dans le produit sec. Les quartiers résidentiels anciens et les grandes propriétés donnent parfois des quantités de résidus combustibles atteignant 1,8 à 2,2 kg par habitant et par jour. Dans les quartiers plus neufs, dans les immeubles locatifs modernes ou lorsque les ordures sont incinérées ou compostées à domicile, le poids peut descendre en dessous de 700 g et souvent même de 450 g par habitant et par jour. Les résidus combustibles normalement tassés pèsent de 115 à 230 kg par m³ et peuvent être comprimés jusqu'à une densité de 345 à 400 kg par m³. Toutefois un tel tassement est rarement obtenu dans les bennes collectrices municipales du type usuel.

La quantité de rebuts non combustibles et impropres au compostage (boîtes de conserve, bouteilles, porcelaines et métaux) varie de 45 à 500 g par habitant et par jour, et se tient habituellement entre 135 et 350 g. On obtient toutefois des chiffres beaucoup plus élevés si l'on y inclut les cendres et mâchefers. La cendre peut être ajoutée aux matières mises à composter ou mélangée aux boues d'égouts, pour absorber l'humidité, ou encore être répandue directement sur le sol.

Les diverses sortes d'ordures, à savoir les ordures ménagères et les autres déchets, combustibles ou non, sont fréquemment collectées ensemble. La quantité d'ordures de toutes sortes ainsi ramassées dans les collectivités urbaines varie entre 0,3 et 2 kg par habitant et par jour et sera le plus souvent comprise entre 0,35 et 1,3 kg, avec une moyenne inférieure à 0,9 kg.

On possède des données sur la quantité d'ordures provenant de villes situées dans différentes régions du monde. Ainsi, une enquête ^{59, 80} effectuée dans 13 villes de Californie a montré que la quantité des ordures de toutes sortes variait de 0,47 à 1,88 kg par habitant et par jour, avec une moyenne de 0,93 kg.

A Berkeley (Californie), la moyenne est de 0,57 kg d'ordures de toutes sortes par habitant et par jour ; la composition physique et chimique moyenne est indiquée dans le tableau 5.

TABEAU 5. NATURE ET COMPOSITION CHIMIQUE MOYENNES DES ORDURES DE TOUTES SORTES RAMASSÉES A BERKELEY (CALIFORNIE)⁴¹

Composition physique		Composition chimique	
Éléments composants	Pourcentage en poids lors du ramassage	Éléments composants ^a	Pourcentage
Boîtes de conserve	9,8	Eau (lors du ramassage)	49,3
Bouteilles et débris de verre	11,7	Cendres (après déshydratation)	28,5
Chiffons ^b	1,6	Carbone (après déshydratation)	35,7
Métaux	0,9	Azote (après déshydratation)	1,07
Déchets divers sans valeur, impropres au compostage	7,6	Phosphore, exprimé en P_2O_5 (après déshydratation)	1,16
Matières se prêtant au compostage ^c (ordures ménagères, substances végétales, papier, etc)	68,4	Potassium, exprimé en K_2O (après déshydratation)	0,83

^a Rapport C/N = 33,8^b Les chiffons et le papier propre se prêtent au compostage mais il est plus profitable de les récupérer.^c Matières se prêtant au compostage = 380 g par habitant et par jour = 157 kg par habitant et par année

A Long Beach (Californie) — ville comprenant de nombreuses maisons individuelles entourées d'un jardin et sans chauffage au charbon — la quantité totale d'ordures atteint en moyenne 1,4 kg par habitant et par jour, dont 0,3 kg d'ordures ménagères, 0,7 kg de résidus combustibles et 0,4 kg de déchets non combustibles.⁷³ En admettant que les ordures ménagères et les résidus combustibles — qui représentent ensemble 70 % environ du total — se prêtent presque entièrement au compostage, la quantité des matières utilisables est, par habitant, d'environ 1 kg par jour ou de 400 kg par année.

La Compost Corporation of America a analysé en 1952 un fort tonnage d'ordures non triées provenant d'Oakland (Californie) pour déterminer les quantités relatives de déchets récupérables, de matières se prêtant au compostage et de substances inorganiques. Ces recherches, faites dans une installation-pilote de compostage, avaient pour but de dégager des données techniques et économiques pour l'établissement des plans d'une grande usine. Sur la base des résultats de ces analyses, les prévisions ont été calculées en fonction de la composition pondérale moyenne suivante :

	%
Boîtes de conserve	10
Papier (divers, propres)	7
Chiffons (divers)	1,5
Métaux non ferreux	0,5

	%
Métaux ferreux	0,7
Fil de fer	0,3
Verre jaune	4
Verre blanc	5
Bouteilles (récupérables et vendables comme telles)	1
Matières inorganiques (dont une certaine proportion est nécessairement perdue) . .	15
Matières se prêtant au compostage	55

On voit que ces ordures contiennent une quantité considérable de produits récupérables dont le tri serait avantageux.

La teneur moyenne en eau et le poids spécifique (déterminé en mesurant le volume occupé dans les bennes par des charges préalablement pesées) au cours des diverses phases du traitement sont indiqués ci-après :

<i>Matières</i>	<i>Eau (%)</i>	<i>Poids (kg/m³)</i>
Ordures non triées	—	288 à 320
Ordures triées	40 à 50	400
Ordures de toutes sortes pulvérisées, après addition de 10 % de terre (en poids)	50 à 60	960
Compost (non tamisé)	10 à 20	832
Compost (tamisé)	10 +	720 à 800

Aucune indication n'a été fournie sur le tassement des matériaux.

Des données recueillies pour sept communes suburbaines de Detroit (Michigan),⁵⁶ on a calculé les moyennes pondérées suivantes en grammes (par habitant et par jour) : ordures ménagères, 200 ; résidus divers, 360 ; total des ordures, 560. Toutes les ordures ménagères et les résidus organiques sont propres au compostage. A East Lansing (Michigan) la quantité d'ordures ménagères collectées s'élève en moyenne à 300 g par habitant et par jour.

En Grande-Bretagne, l'Institute of Public Cleansing⁵⁶ donne, pour la quantité des ordures de toutes sortes collectées par habitant, les chiffres de 710 g par jour ou 280 kg par an, et fournit les indications suivantes concernant la composition :

	%
Poussières et cendres	60,2
Matières végétales et putrescibles	12,5
Papier	12,6
Métaux	3,7
Textiles	1,8
Verre	2,8
Os	0,5
Débris combustibles	2,2
Débris non combustibles	3,7

TABLEAU 6. TENEUR APPROXIMATIVE EN AZOTE ET RAPPORT C/N DE CERTAINES MATIÈRES SE PRÊTANT AU COMPOSTAGE (PRODUIT SEC)

Matières	N (%)	C/N
Urines	15-18	0,8
Sang	10-14	3
Déchets de poissons	6,5-10	—
Fumier de basse-cour	6,3	—
Déchets divers des abattoirs	7-10	2
Excreta	5,5-6,5	6-10
Boues activées	5,0-6,0	6
Déchets de viande	5,1	—
Pourpier	4,5	8
Gazon coupé	4,0	12
Fumier de mouton	3,75	—
Fumier de porc	3,75	—
Amarante	3,6	11
Laitue	3,7	—
Choux	3,6	12
Tomates	3,3	12
Tabac	3,0	13
Oignons	2,65	15
Poivrons	2,6	15
Chiendent	2,55	19
Luzerne	2,4-3,0	16-20
<i>Kentucky blue grass</i>	2,4	19
Herbe coupée, tout venant (moyenne)	2,4	19
Fumier de cheval	2,3	—
Fanes de navets	2,3	19
Bouton d'or	2,2	23
Ordures ménagères brutes	2,15	25
Seneçon	2,15	21
Fumier de ferme (moyenne)	2,15	14
Pain	2,10	—
Varechs	1,9	19
Trèfle incarnat	1,8	27
Fumier de vache	1,7	—
Farine de blé	1,7	—
Carottes entières	1,6	27
Moutarde	1,5	26
Fanes de pommes de terre	1,5	25
Fougères	1,15	43
Ordures de toutes sortes, Berkeley (Californie) (moyenne)	1,05	34
Paille d'avoine	1,05	48
Navets entiers	1,0	44
Déchets de lin (phormium)	0,95	58
Fléole des prés	0,85	58
Agrostides	0,85	55
Paille de blé	0,3	128
Sciure pourrie	0,25	208
Sciure fraîche	0,11	511
Papier d'emballage pour pain	néant	—
Papier journal	néant	—
Papier fort d'emballage	néant	—

Il s'agit, dans cette analyse, d'ordures provenant d'une région où le chauffage se fait au charbon, où des quantités considérables de papier sont récupérées et où l'on utilise pour le jardinage une partie des débris provenant de l'entretien des pelouses et des jardins. C'est ce qui explique la forte proportion des poussières et des cendres ; celles-ci, qui contiennent des phosphates et de la potasse, pourraient être mélangées au compost, mais elles ne subiraient pas de décomposition biologique. Il est probable que ces ordures présentent un rapport C/N qui permettrait, si l'on pouvait négliger les problèmes de santé publique, de les répandre directement sur le sol sans compostage préalable, car elles n'appauvriraient pas la terre en azote. En supposant que les matières végétales, le papier, les textiles, les os et les débris combustibles se prêtent au compostage, on pourrait traiter 29,6 % du total, soit 82 kg d'ordures par habitant et par an.

Lund Humphries⁵⁵ a calculé qu'en Grande-Bretagne la quantité totale des ordures collectées (non compris les eaux usées) s'élève à 760 g par jour ou 280 kg par année et par habitant, avec une teneur en eau de 25 à 55 %. L'analyse donne les moyennes suivantes : poussières fines et cendres, 55 % ; matières organiques, 18 % ; papier et chiffons, 17 % ; métaux, verre, etc., 9 % ; et os, 1 %. Il est probable que 36 % de ces ordures, soit 100 kg par habitant et par année, se prêtent au compostage.

Il ressort d'informations concernant la ville de Baden-Baden (Allemagne)⁵⁶, que la quantité des ordures propres au compostage atteint environ 370 g par jour ou 152 kg par an et par habitant.

Selon les évaluations de Acharya,¹ la quantité d'ordures se prêtant au compostage, y compris les poussières, les balayures des rues, le papier, les ordures ménagères et les substances végétales (*katchra*), peut atteindre jusqu'à 700 g par jour et par habitant dans des villes comme Bombay, mais n'est que de 220 à 340 g dans les petites villes et les villages. Selon le même auteur, ces ordures contiendraient environ 25 à 30 % de substances organiques et leur teneur en eau serait de 10 à 20 % au moment du ramassage.

Scott⁶⁸ a calculé que les ordures de toutes sortes provenant de Tsinan (Chine) contiennent, après déshydratation, environ 45 à 60 % de matières organiques et 40 à 55 % de cendres. Les teneurs en azote, en P_2O_5 et en K_2O sont respectivement de 0,8 %, 0,35 % et 0,6 %. Dans les opérations de compostage de van Vuren⁸² en Afrique du Sud, la quantité d'ordures ramassées s'élevait à environ 0,5 livre par habitant et par jour, avec un volume de 0,7 m³ pour mille habitants.

Pour l'ensemble des villes de la Nouvelle-Zélande, la quantité moyenne d'ordures se prêtant au compostage, à l'exclusion des poussières et des cendres, est évaluée à 112 kg par habitant et par an, avec un volume de 3 m³ par tonne.⁵⁶ La production des villes de Auckland et de Wellington est estimée à 152 kg par habitant et par année. A Masterton, la partie des

ordures qui se prête au compostage, et qui représente 60 % du total, est évaluée à 76 kg par habitant et par année.

Teneur en azote de diverses matières

Le tableau 6 donne des chiffres provenant de sources diverses concernant la teneur approximative en azote ^{1, 56, 59, 79, 83} et le rapport C/N de certaines des matières qui peuvent servir à la préparation de composts. La question du rapport C/N est examinée de manière plus approfondie au chapitre 5 (voir page 52).

PRINCIPES FONDAMENTAUX

Dans la préparation d'un programme comme dans l'analyse d'opérations de compostage, il importe de tenir compte de plusieurs facteurs essentiels, dont certains sont interdépendants. Certaines méthodes peuvent être appliquées avec les meilleurs résultats économiques dans des circonstances différentes. L'analyse des méthodes en fonction de ces facteurs fondamentaux permettra soit : *a)* de choisir une technique classique qui convienne bien à la situation donnée, *b)* de choisir un ensemble de modalités concrètes d'application empruntées à diverses techniques classiques, ou *c)* d'élaborer d'autres méthodes répondant de la manière la plus économique aux exigences du cas particulier. On examinera ci-après les facteurs principaux qui interviennent dans les opérations de compostage. Ce sont : 1) le triage des ordures et la récupération de certains produits ; 2) le broyage et la dilacération des ordures ; 3) le rapport C/N ; 4) le mélange ou le dosage des diverses catégories d'ordures ; 5) la teneur en eau ; 6) la disposition des matières mises à composter ; 7) la température ; 8) l'aération ; 9) la flore microbienne ; 10) l'ensemencement ; 11) le pH ; 12) les conditions climatiques ; 13) la destruction des germes pathogènes ; 14) la lutte contre les mouches ; 15) la récupération de l'azote et d'autres éléments nutritifs ; 16) le temps requis pour le compostage ; 17) l'appréciation de l'état du compost ; 18) la qualité des composts ; 19) les aspects économiques du compostage.

Triage des ordures et récupération de certains produits

Lorsque les ordures ne sont pas triées au ramassage — c'est-à-dire lorsque les éléments combustibles et non combustibles ne sont pas enlevés séparément — il est souhaitable et généralement nécessaire d'éliminer les éléments récupérables et les matières impropres au compostage. En effet, il est fréquemment indiqué de dilacérer les matières entrant dans le compost ; or, les boîtes de conserves, les métaux divers, les débris de verre et de porcelaine et les fragments de béton ne peuvent être broyés qu'avec difficulté et à grands frais.

Les chiffons, les métaux ferreux et non ferreux, les boîtes de conserves, certains papiers et le verre, peuvent être récupérés et cette opération sera souvent d'un bon rapport. Il existe habituellement d'excellents débouchés

pour les chiffons et les vieux métaux, qui peuvent être triés et écoulés avec profit sur des marchés éloignés. De même, il est avantageux de récupérer le papier et le verre lorsque les frais de transports jusqu'au débouché ne sont pas trop élevés. Certaines bouteilles ont une valeur marchande en tant que telles et non pas en raison de la matière première. Enfin, l'ensemble des opérations de compostage exige un triage qui donne de la valeur à des matériaux dont on n'aurait pas entrepris la récupération.

La vente des matériaux récupérés exige un certain traitement préalable : lavage du verre, mise en balles du papier, des chiffons et des boîtes de conserves écrasées, nettoyage des métaux, etc. Avant de mettre en place l'équipement nécessaire à la récupération, il faut faire une étude de marché pour savoir jusqu'à quel point il est profitable de pousser ces opérations.

Les boîtes de conserves et autres métaux ferreux peuvent être facilement séparés au moyen d'un électro-aimant, tandis que le papier propre peut être aspiré par succion pneumatique. Les chiffons, les métaux non ferreux ayant une certaine valeur, les bouteilles et autres objets de verre ou de céramique peuvent être retenus mécaniquement par criblage ou enlevés à la main sur le transporteur ou la plate-forme. De petits morceaux de verre peuvent être acheminés sans inconvénient vers le broyeur, mais la plupart des appareils de broyage ne sont pas capables de concasser efficacement les gros tessons. Le verre pulvérisé ne sera pas particulièrement nuisible au compost, car il ne se distingue pas du sable.

Dans les villes utilisant des poubelles distinctes pour les différentes catégories d'ordures, on peut s'en remettre dans une large mesure aux particuliers et aux entreprises commerciales pour assurer le triage, en demandant que seuls certains résidus spécifiés tels qu'ordures ménagères, papiers, objets de caoutchouc et débris végétaux soient placés dans les boîtes destinées aux déchets à composter. Malgré cela, une surveillance constante doit être exercée dans les usines de compostage pour éviter que les appareils de broyage ne soient endommagés par de gros objets en métal placés par négligence dans les boîtes à ordures. Dans les localités où la collecte en vrac est d'usage, il est probable que la population n'acceptera pas facilement des décisions qui lui imposeraient la complication supplémentaire d'un triage. De toute façon, l'opération ne pose pas de problème difficile et ne doit pas faire obstacle au compostage.

Dans les villages et les régions agricoles, le triage et le broyage n'imposeront certainement pas une tâche considérable, car les métaux et autres matières utilisables auront déjà été mis à part avant le ramassage et les ordures collectées ne contiendront en général que de faibles quantités de détritiques impropres à la fabrication du compost.

Les méthodes et les appareils utilisés pour le triage et la préparation de déchets récupérables sont examinés de manière plus détaillée au chapitre 6 (voir page 128).

Dilacération des ordures

La dilacération ou le broyage des matières brutes destinées au compostage peut présenter de nombreux avantages, notamment lorsqu'on utilise des ordures urbaines. En effet, les bactéries pénètrent plus facilement dans la masse lorsqu'on leur offre une plus grande surface d'attaque et qu'on détruit la résistance naturelle des végétaux à leur invasion. On conçoit qu'un morceau de bois, un livre ou un gros quartier de viande ne peuvent pas se décomposer en un temps relativement bref dans un tas en compostage. En outre, la quantité d'oxygène au centre de tels objets n'est pas suffisante pour assurer une décomposition aérobie rapide. Golueke²² a observé en compostant du fumier de porc, que des conditions d'anaérobiose apparaissaient dans les gros morceaux de fiente qui n'avaient pas été broyés ; néanmoins, l'ensemble de la masse était suffisamment aérobie pour atteindre les hautes températures souhaitées. Il a observé également que la dilacération permettait d'obtenir une décomposition plus uniforme et plus rapide. Ce traitement rend les matières plus homogènes, leur donne une aération initiale utile et produit une consistance qui facilite ensuite le contrôle de l'humidité et de l'aération, ainsi que le transport et la manipulation. Les ordures dilacérées s'échauffent de façon plus uniforme et résistent mieux à une dessiccation excessive de la surface du tas ; elles sont en outre mieux protégées contre les déperditions de chaleur et l'eau de pluie y pénètre moins que dans les déchets non broyés. D'autre part, il est plus facile d'éviter le pullulement des mouches. Enfin, les utilisateurs du compost estiment que les matières broyées ou morcelées peuvent être épandues plus aisément et plus uniformément sur la terre.

La dimension optimum des fragments est d'un peu moins de 5 cm dans le sens de la plus grande longueur, mais des parcelles plus volumineuses peuvent également être compostées sans inconvénient. La finesse du broyage est régie dans une certaine mesure par les spécifications prévues pour le produit fini et par le prix de revient d'une nouvelle mouture en fin de cycle. Si le produit doit être utilisé sur des pelouses, dans des jardins d'agrément ou dans des potagers, il doit être tamisé ou moulu après compostage jusqu'à ce qu'il traverse des cribles à mailles de 1 cm environ, afin de lui donner meilleure apparence et d'en faciliter l'épandage et l'incorporation dans le sol.

Lorsque le compostage s'effectue dans des exploitations agricoles ou dans des villages, on peut se demander si les avantages du broyage sont suffisants pour justifier l'augmentation de dépenses qu'il entraîne. Les fragments trop volumineux peuvent être en ce cas enlevés à la fourche ou au crible et morcelés s'il y a lieu. L'exploitant agricole qui prépare lui-même le compost se montre moins exigeant quant à l'uniformité de décomposition et à la consistance que lorsqu'il l'achète tout fait. En outre, l'uniformité a moins d'importance pour les cultures de céréales que pour les cultures maraîchères.

Toutes les ordures destinées au compostage n'exigent pas un broyage initial. Il est souvent préférable de traiter seulement les fragments volumineux de matières organiques qui restent après enlèvement mécanique des produits récupérables, des déchets qui ne se prêtent pas au compostage et des parcelles les plus fines. Certains fabricants de compost estiment d'ailleurs qu'en conservant un certain nombre de morceaux irréguliers et volumineux, on ménage de plus grands espaces vides à l'intérieur de la masse, ce qui permet d'y retenir plus d'oxygène. En outre, les détritiques urbains sont assez abrasifs et peuvent endommager les tranchants des broyeurs à marteaux et autres dispositifs à lames. Il existe certes des broyeurs capables de pulvériser des objets résistants tels que les boîtes de conserves et les culs de bouteille, mais ils ne peuvent en général pas servir de manière satisfaisante à broyer les ordures ménagères au cours de la même opération. D'autre part, il convient d'éviter de pulper complètement les ordures ménagères et les matières végétales, car elles risquent de devenir trop pâteuses pour une bonne décomposition aérobie. Afin de réduire l'abrasion, on mouille parfois les ordures avant le broyage, mais la forte teneur en eau qui en résulte les rend ensuite peu propres au compostage. Le compost fini est moins abrasif et plus facile à pulvériser, grâce à la décomposition biologique qui l'a ameublé. La méthode de broyage ou de dilacération dépend de la nature de la matière brute, mais il faut se garder de compliquer inutilement l'opération. On passe parfois les ordures sur des cribles rotatifs ou à secousses pour éliminer les cendres et les particules fines. Une partie des cendres peuvent être laissées sur le compost, afin de tamponner l'acidité et d'absorber l'humidité en cas d'adjonction de boues d'égouts.

A Wijster (Pays-Bas), les ordures, mises à composter sans broyage préalable, sont ensuite pulvérisées au moyen d'un broyeur à marteaux. Les boîtes de conserves et les objets en métal mince sont si fortement attaqués pendant le compostage aérobie, qu'il est ensuite facile de les briser. Dans d'autres usines de compostage — par exemple à Schiedam et à Flessingue — on pratique le broyage préalable à l'aide d'appareils analogues à la râpe VAM décrite plus haut. Le broyeur Dano, dont il a été question plus haut à propos du procédé Dano, permet de résoudre certains des problèmes d'abrasion que pose l'emploi des broyeurs à marteaux, mais il exige une grosse dépense d'énergie. Dans le procédé *Bio-stabilizer* de Dano, la seule préparation nécessaire est le broyage initial des gros fragments, tels que les branches d'arbres ou les trognons de choux. La décomposition biologique et l'abrasion qui se produisent dans le cylindre rotatif entraînent une désintégration suffisante pour que la plus grande partie des matières passent au travers d'un crible à mailles de 1 cm. Ce qui reste sur les cribles est remis dans le circuit en vue d'une décomposition plus complète.

La Compost Corporation of America a mis au point un broyeur d'ordures considéré comme très efficace et économique. Cet appareil, dérivé des modèles à marteau oscillant, a été conçu pour traiter des quantités

importantes avec une faible consommation d'énergie. En Angleterre, on utilise un appareil dit *Lightning Pulverizer*, qui est un broyeur à marteaux. La Gruendler Crusher and Pulverizer Company, à Saint-Louis (Missouri), Etats-Unis d'Amérique, a mis au point un matériel de broyage et recommande de broyer les ordures brutes et de dilacérer le compost fini ou de le passer sur un crible à secousses.

Les économies que la suppression du broyage préliminaire permet de réaliser compensent très fréquemment la perte de certains avantages. Les fragments volumineux non décomposés peuvent être éliminés du produit fini par criblage et remis dans le circuit. Le choix dépendra des conditions locales d'exploitation.

Le but du traitement mécanique final — broyage, dilacération, mouture ou criblage — est de séparer les particules volumineuses qui se seraient agglomérées, de donner au compost un meilleur aspect et de rendre la texture plus fine qu'après le broyage initial, ce qui assure un épandage plus uniforme lorsque le produit est utilisé en surface. Le second broyage peut être effectué, soit après maturation, au moment où le compost est prêt pour l'usage ou la mise en sac, soit vers la fin du processus de maturation. Dans ce dernier cas, l'opération remplace le dernier brassage normalement effectué pour assurer l'aération, et la stabilisation peut ensuite s'achever dans les grands tas de stockage. L'intérêt de cette méthode dépendra des conditions économiques dans lesquelles elle s'insère dans l'ensemble des manipulations. Il existe des broyeurs pourvus de dispositifs permettant de régler le broyage et le criblage de manière à obtenir des particules plus fines ; ces appareils peuvent donc être utilisés à la fois pour le traitement préalable et pour le traitement final. Toutefois, lorsque les quantités sont importantes, il est plus économique d'avoir des installations différentes pour les deux broyages. Quand les ordures ont été préalablement dilacérées, l'opération finale peut souvent se faire sur des tambours qui émettent les mottes agglomérées. Les méthodes et les installations utilisées pour le broyage et la dilacération seront examinées de façon plus détaillée au chapitre 6 (voir page 130).

Il convient de souligner à nouveau que l'opportunité du traitement mécanique dépend de la nature des matières brutes, des caractéristiques — aspect, dimension des particules et qualité — que l'on désire donner au produit fini et des exigences économiques de l'opération.

Rapport carbone/azote

Le processus de décomposition des matières organiques est, comme on l'a indiqué précédemment, influencé par la présence de carbone et d'azote. Le rapport C/N exprime les proportions respectives de ces deux éléments. Lorsqu'une matière contient, par exemple, 25 fois plus de car-

bone que d'azote, on dit que le rapport C/N est de 25 : 1 ou plus simplement de 25. En fait, c'est seulement le rapport entre les quantités utilisables des deux éléments qui compte, car une partie du carbone peut se présenter sous une forme si résistante à l'attaque biologique qu'elle n'intervient pratiquement pas.

On a déjà vu que la décomposition des matières organiques est provoquée par des organismes vivants qui utilisent le carbone comme source d'énergie et l'azote comme élément constitutif de la substance cellulaire. Ce processus exige plus de carbone que d'azote, mais lorsque l'excédent de carbone est trop considérable, la décomposition est ralentie à partir du moment où les réserves d'azote sont consommées, et certains organismes meurent ; l'azote qu'ils ont assimilé est alors utilisé par d'autres organismes pour constituer leur substance cellulaire et de nouvelles quantités de carbone sont brûlées dans cette opération. De la sorte, la quantité de carbone est ramenée à un niveau plus satisfaisant tandis que l'azote est réintroduit dans le cycle. Cependant, le processus exige davantage de temps lorsque le rapport C/N initial est très supérieur à 30.

Dans le sol, la succession des cycles de l'azote qui se produisent en présence d'un fort excédent de carbone fait intervenir un autre facteur : l'azote que la terre contient sous une forme utilisable par les bactéries. En ce cas, si le rapport C/N est trop élevé, les cellules microbiennes vivantes consomment au maximum le carbone disponible en retirant du sol, dans des proportions appropriées, l'azote qui y est contenu sous une forme utilisable par elles. Le sol est donc « dépouillé » de son azote, dont l'action fertilisante sur la croissance des plantes sera retardée jusqu'au moment où il ne sera plus utilisé dans le cycle biologique des bactéries du sol. A l'opposé, lorsque la source d'énergie, c'est-à-dire le carbone, est inférieure à la quantité requise pour convertir tout l'azote disponible en protéines, les micro-organismes consomment le carbone disponible et éliminent l'excès d'azote sous forme d'ammoniac. Il en résulte une perte d'azote dans le tas de compost lorsque le gaz ammoniac peut s'échapper dans l'air ; il convient par conséquent de réduire cette production de gaz au minimum. La récupération de l'azote est examinée plus loin dans une section distincte (voir page 94).

On admet généralement qu'un rapport C/N égal à 20 (C et N étant ici les quantités effectivement utilisables) représente la limite supérieure en-deça de laquelle l'appauvrissement du sol n'est pas à craindre. Si une partie considérable de carbone se présente sous la forme de lignine ou d'autres substances résistantes, le rapport C/N (quantités totales) peut sans inconvénient dépasser 20. Comme il importe avant tout d'éviter que le sol soit dépouillé de son azote et qu'il faut conserver une quantité maximum d'azote dans le compost, le rapport C/N constitue un facteur critique.

Il s'ensuit que la valeur de ce rapport qui représente l'optimum pour le compostage ne saurait être la meilleure pour le sol. Comme les orga-

nismes vivants utilisent environ 30 parties de carbone pour 1 partie d'azote,⁸³ un rapport initial de 30 (quantités utilisables) semblerait le plus avantageux pour un compostage rapide et assurerait la présence, dans le compost fini, d'une certaine quantité d'azote sous une forme immédiatement utilisable. Certains chercheurs donnent des valeurs optimums allant de 26 à 31,^{3, 65, 67, 68, 81} et la majorité d'entre eux estiment que des rapports supérieurs à 30 n'entraîneraient que de faibles pertes d'azote. Des études ont été effectuées par l'Université de Californie⁸¹ sur des matières dont le rapport C/N initial allait de 20 à 78 et dont la teneur en azote variait de 0,52 à 1,74 % ; il en ressort qu'une valeur initiale comprise entre 30 et 35 constitue l'optimum. Ces chiffres indiqués comme optimums ne sont d'ailleurs pas incompatibles avec la présence de certaines quantités de carbone non utilisable. La durée du compostage s'accroît considérablement lorsque le rapport C/N dépasse l'intervalle de 30 à 40. Si la quantité de carbone non utilisable est faible, le rapport peut tomber jusqu'à 10 sous l'action des bactéries, et l'on observe communément des valeurs comprises entre 14 et 20, selon la nature des matières brutes ayant servi à la production de l'humus. Ces études⁸¹ ont montré que le compostage de matières présentant un rapport C/N de 78 donne dans l'humus final un rapport de 35. Un tel produit n'est pas nuisible au sol, car le carbone en excédent devient utilisable à un rythme si lent que la quantité d'azote « dérobée » est insignifiante. Ainsi donc, la diminution du rapport C/N donne un indice utile de l'état d'avancement du compostage.

Le tableau 6 (voir page 45), qui indique les valeurs correspondant à plusieurs catégories de matières, peut être utilisé pour l'évaluation des rapports C/N initiaux.

Mélange ou dosage des matières

La plupart des producteurs de compost, amateurs ou professionnels, savent prévoir, au seul aspect des matières, la composition qui donnera un bon produit fini. Lorsqu'un dosage est souhaitable, un opérateur expérimenté peut généralement le faire par simple examen visuel de la quantité et de la nature des matières. Cependant, dans une usine municipale traitant des quantités importantes, il peut arriver, exceptionnellement en fait, que des analyses de laboratoire s'avèrent nécessaires pour effectuer un mélange.

Le rapport C/N et l'humidité sont les deux facteurs à considérer dans le dosage. Aucun mélange n'est nécessaire lorsque le rapport C/N est compris entre 25 et 50, encore qu'un rapport de l'ordre de 30 à 40 soit préférable. Si l'usine reçoit séparément, d'une part, des ordures contenant des quantités considérables de papier, de paille, de sciure et d'autres substances riches en carbone, et, d'autre part, des produits azotés tels que sang,⁶⁶ déchets d'abattoirs, détritiques de poissons, excréments ou boues

d'égouts, il conviendra de mélanger les éléments à fort et à faible rapport C/N de manière à obtenir un rapport proche de l'optimum. De même, on mélangera en proportions convenables des matières trop sèches pour se prêter à un compostage satisfaisant et les matières trop humides qui dégageraient des odeurs gênantes. Lorsqu'on procède à un broyage préliminaire, le dosage se fait en général dans le broyeur ; dans les autres cas, les matières sont mélangées lors de la mise en tas ou en fosse.

Certains fabricants de compost ajoutent de la terre aux matières organiques, croyant ainsi augmenter le nombre de micro-organismes et accélérer la décomposition. En réalité, ainsi qu'on le verra plus loin, les germes nécessaires sont apportés par les substances organiques elles-mêmes et ceux qui sont contenus dans la terre ajoutée n'ont pas d'effet appréciable. De même, on utilise parfois de la terre sèche pour réduire l'humidité et pour absorber l'ammoniac dans les matières à faible rapport C/N. Cette méthode se justifie en l'absence de matières organiques sèches en quantité suffisante, mais la récupération d'azote ainsi obtenue demeure faible. Les résultats sont bien meilleurs lorsqu'on ajoute des matières organiques contenant de la cellulose pour porter le rapport C/N au-dessus de 30. Par contre, dans les composts à forte teneur en matières organiques, l'addition de terre permet de tamponner l'acidité et produit un effet diluant qui retarde la fermentation. Elle peut aussi servir à améliorer l'aspect du compost fini, à lui donner une texture plus granuleuse et à le rendre plus facilement maniable en lui assurant une plus grande consistance. Enfin, il arrive que certains fabricants de compost ajoutent de la terre en vue de forcer le poids du produit lors de la vente. Quoi qu'il en soit, il faut veiller à ne pas porter le pourcentage des cendres (en poids sec) à plus de 50 %, si l'on désire obtenir des températures élevées et une décomposition rapide. En général l'addition de terre dans une proportion dépassant 10 % est d'un intérêt douteux, sauf s'il y a lieu de craindre une forte déperdition d'azote. En résumé, on peut dire que, si ce procédé ne nuit pas au compost et peut même être utile dans certaines circonstances, notamment pour combattre l'excès d'humidité, aucun agriculteur ne voudra acheter et transporter, au lieu d'humus et d'éléments nutritifs, de la terre que ses champs peuvent lui fournir en abondance.

Bien que les cendres et le mâchefer contiennent du phosphore et de la potasse qui sont utiles au sol, il est préférable, lorsqu'on peut faire autrement de ne pas en introduire de grandes quantités dans les tas de compost, car l'élévation du pH due au caractère basique de ces résidus facilite les pertes d'azote. Le mélange peut se faire après coup, lorsque le compost est prêt et relativement sec. S'il est impossible de séparer les cendres mêlées aux matières à composter, on ne renoncera pas à l'opération mais il faudra veiller à maintenir un degré suffisamment élevé d'humidité et à assurer dans le tas de compost un rapport C/N et une consistance aussi satisfaisants que possible.

La quantité d'excreta que l'on peut ajouter aux tas de compost dépend de la composition des autres matières que ceux-ci contiennent. En pareil cas, il est souhaitable de maintenir le rapport C/N au-dessus de 30, afin d'assurer l'échauffement nécessaire à la destruction des germes pathogènes tout en réduisant au minimum la perte d'azote. Scott⁶⁸ a constaté que les œufs de *A. lumbricoides* sont détruits même lorsque la quantité de fèces humaines présentes dans le tas atteint 70 % en poids. Néanmoins, il recommande de ne pas dépasser 10 à 20 % pour la plupart des conditions de production qu'il a rencontrées en Chine. Van Vuren⁸² a traité des excreta mélangés à des ordures sèches à raison de 150 à 300 litres par m³. Les proportions les plus satisfaisantes étaient de 150 et 225 litres par m³. L'addition de 300 litres par m³ donnait une masse trop détrempée. On obtient en général de bons résultats avec une quantité allant de 10 à 25 % du poids des ordures. Lorsque la masse est constituée par de la paille sèche et du fumier de ferme, on peut lui ajouter jusqu'à 50 à 60 % de son poids d'excreta.

Lorsqu'on les mélange avec des ordures non broyées, on peut suivre avec des résultats satisfaisants la règle suivante : ne pas dépasser la proportion qui permet de poser le pied sur la masse sans qu'il s'enfonce.

La quantité de boues d'égouts que l'on peut ajouter aux ordures dépend de l'humidité de chacun de ces deux éléments. Dans diverses usines, on mélange à poids égal les boues d'égouts digérées et les ordures. A Baden-Baden, on ajoute aux ordures sèches et compactes un volume égal de boues contenant 15 % de matières solides. On obtient ainsi un degré d'humidité voisin de la limite supérieure compatible avec un compostage aérobie.

Humidité

En assurant une aération suffisante, on peut obtenir une décomposition aérobie avec un degré d'humidité compris entre 30 et 100 %. Dans la pratique, il convient toutefois d'éviter une humidité trop forte, car l'eau, en chassant l'air des interstices entre les particules, fait naître des conditions d'anaérobiose. A l'inverse, une humidité trop faible prive les organismes de l'eau nécessaire à leur métabolisme et inhibe par conséquent leur activité.

Il résulte des recherches effectuées par l'Université de Californie⁸¹ que le degré d'humidité des ordures urbaines étudiées était habituellement compris entre 40 et 60 %, chiffre considéré comme le plus favorable pour le compostage aérobie. Selon Scott,⁶⁸ le chiffre optimum serait 50 à 60 %, tandis que Acharya¹ propose 45 à 50 %. Waksman⁸⁴ recommande de son côté une humidité de 75 à 80 % pour composter le fumier de ferme. Le maximum compatible avec un compostage aérobie satisfaisant varie selon les matières utilisées. Lorsque la masse contient des quantités considérables de paille et de substances fibreuses résistantes, son degré d'humidité peut être beaucoup plus élevé sans que sa consistance soit altérée, et sans qu'elle devienne trop détrempée et trop compacte pour admettre suffisamment

d'air dans les interstices. Si par contre les matières utilisées contiennent une forte proportion de papiers et d'ordures ménagères, qui s'amollissent quand on les mouille, ou si elles ont une texture granuleuse, comme les cendres et la terre, on aura de la peine à entretenir des conditions d'aérobiose au-dessus de 70 % d'humidité.

Dans les études effectuées par l'Université de Californie,⁵¹ des matières fibreuses contenant une quantité considérable de paille ont été compostées en aérobiose avec un degré d'humidité de 85 à 90 %, mais d'autres composts, contenant beaucoup de papier, sont devenus anaérobies en l'espace d'une journée à une humidité d'environ 70 %.

Différentes substances peuvent être ajoutées aux excréta, aux boues d'égout, aux eaux usées ménagères et au fumier de porcherie, qui sont souvent trop humides. Parmi ces additifs, la paille et les matières fibreuses sont les plus efficaces ; à défaut, la sciure sèche et la terre donnent des résultats satisfaisants, tandis que le papier n'a qu'une utilité très limitée. Dans les cas où l'addition de paille ou de sciure élèverait indûment le rapport C/N, on peut réduire l'humidité par évaporation en retournant la masse plus fréquemment pour l'aérer. Si par contre le rapport C/N est faible, il est avantageux d'ajouter des substances fibreuses, car elles éviteront les pertes d'azote produites par le retournement. Inversement, lorsque la teneur en humidité est trop faible (au-dessous de 40 %), il suffit d'ajouter de l'eau au début de l'opération et d'arroser quand on retourne.

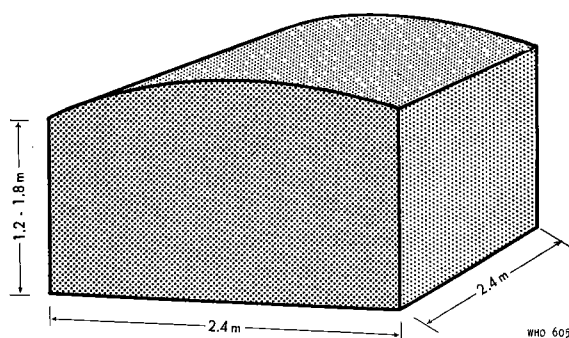
Un degré d'humidité très élevé est acceptable lorsque le compostage s'effectue dans un digesteur à aération mécanique du type *Bio-stabilizer*. Il peut être facilement déterminé par séchage et pesée en laboratoire. Cependant, ces mesures sont rarement nécessaires, sauf dans les essais ou lorsqu'il s'agit de fixer un mode opératoire, car un peu d'expérience suffit pour se rendre compte d'un coup d'œil si l'humidité se situe dans les limites voulues.

Dans le compostage anaérobie l'humidité joue un rôle moins important puisque l'oxygénation n'intervient pas. La limite maximum, qui peut aller en ce cas de 80 % à plus de 90 %, est atteinte à partir du moment où l'écoulement d'effluent devient excessif. Si le compostage doit s'effectuer au début dans des conditions d'aérobiose, afin de produire pendant quelques jours les hautes températures nécessaires à la destruction des germes pathogènes, puis se poursuivre en anaérobiose, le degré maximum d'humidité initiale peut atteindre 65 à 85 % selon la nature des matières à décomposer.

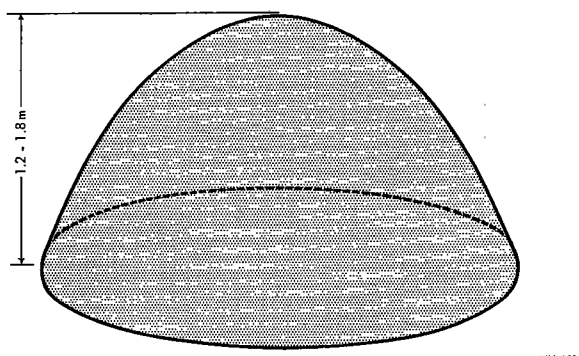
Disposition de la masse à composter

On a utilisé ou préconisé différents dispositifs, tels que bacs, cellules, fosses et digesteurs à aération mécanique en forme de réservoir vertical ou horizontal ou de cuve peu profonde. Lorsqu'on utilise un digesteur à aération mécanique, la disposition de la masse dépend du type de l'appareil.

FIG. 3. MEULE ET TAS DE COMPOST



A. Meule dont la face supérieure peut être plate ou arrondie, selon les conditions climatiques



B. Tas conique d'un diamètre de 2,4 à 3,6 m

Il semble que le coût légèrement plus élevé des opérations de compostage dans les digesteurs limite l'emploi de ces derniers aux usines d'une capacité d'au moins 200 tonnes par jour.

Meules ou silos disposés en plein air à même le sol ou sur une surface cimentée, ou encore tas placés dans une fosse peu profonde, tels sont les moyens, de loin les plus répandus, qu'on utilise pour le compostage et la maturation des déchets organiques. Les modalités particulières d'aménagement et d'utilisation des meules, des silos et des fosses dépendent des circonstances locales : outillage disponible pour la manipulation des matériaux, coût de la main-d'œuvre, et conditions climatiques (température, précipitations et régime des vents).

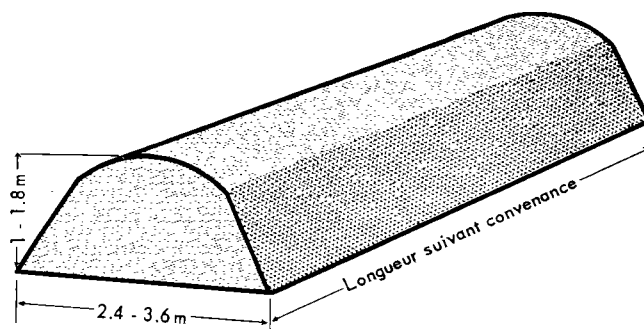
Si l'on veut aérer fréquemment la masse en la retournant, afin d'assurer un compostage aérobic, les meules ou les silos disposés à même le sol semblent plus pratiques que les fosses. Si d'autre part, la décomposition doit être entièrement anaérobie ou ne demeurer aérobic que pendant une brève période initiale, il convient d'utiliser des fosses d'environ 1 mètre

de profondeur dont les autres dimensions varieront selon l'apport quotidien de nouvelles matières. La figure 3 donne le schéma d'une meule et d'un tas conique ; la figure 4 montre un silo et indique différents modes d'aération ; la figure 5 présente le plan d'une fosse.

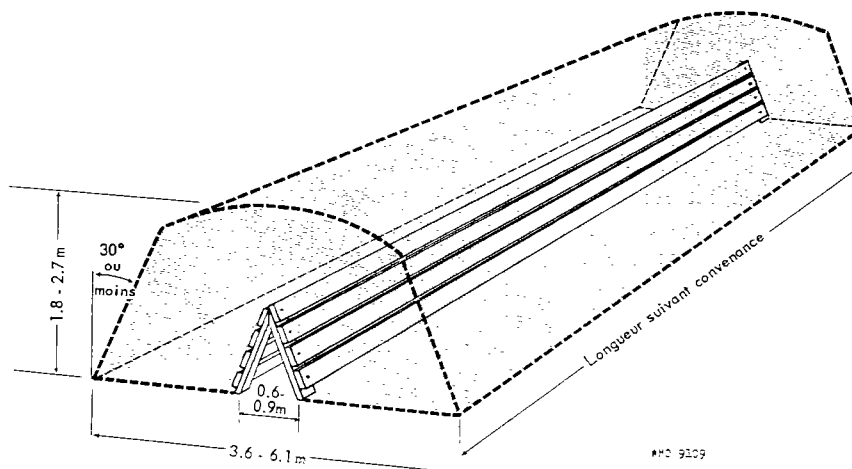
Silos et tas

Dans le compostage aérobique, il faut éviter de comprimer la masse pour que l'air puisse pénétrer aussi facilement que possible dans les interstices. La longueur des meules sera déterminée par la seule commodité, mais leur hauteur joue un rôle assez important. Si la meule est trop haute, la masse sera comprimée par son propre poids, ce qui a pour effet de réduire les interstices, d'augmenter les frais du retournement ou de prolonger l'opération en faisant apparaître des conditions d'anaérobiose. Dans certains

FIG. 4. SILOS



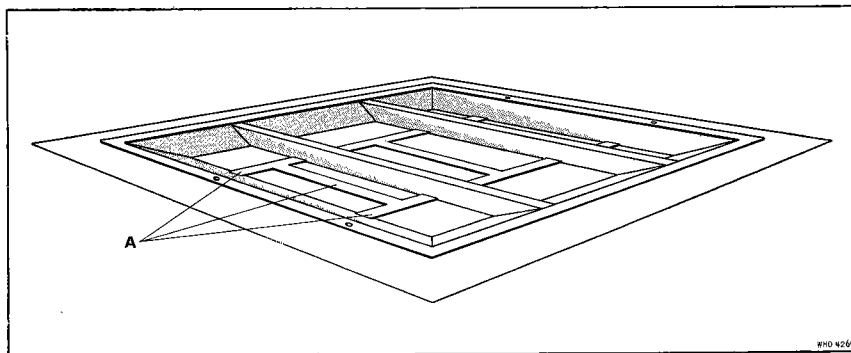
A. Silo à retourner pour aération



B. Silo avec tunnel intérieur d'aération, maintenu par une charpente (en bois, en bambou, en rotin, etc.)

cas, la hauteur maximum sera, en pratique, déterminée par le type d'outillage utilisé pour entasser les ordures ou par la nécessité d'éviter un échauffement excessif du tas. En effet, par temps chaud, les meules de grandes dimensions peuvent atteindre des températures trop élevées pour les bactéries.

FIG. 5. FOSSE DE COMPOSTAGE



A. Rigoles de drainage et d'aération

Les meules trop basses se refroidissent rapidement et ne permettent pas d'obtenir les températures optimums pour la destruction des germes pathogènes et la décomposition par les bactéries thermophiles. En outre, si les dimensions sont trop réduites, la perte d'humidité risque d'être excessive, notamment sur les bords, et la décomposition en sera retardée.

L'expérience indique rapidement la hauteur à choisir pour chaque catégorie d'ordures. Le maximum absolu est d'environ 1,5 à 1,8 m, et le minimum de 1 à 1,2 m pour la plupart des ordures urbaines fraîches broyées. La hauteur peut être plus grande par temps froid que par temps chaud.

La largeur initiale d'un silo sera habituellement comprise entre 2,4 et 3,6 m à la base, afin de faciliter le retournement et de conserver la chaleur. D'autres dimensions et arrangements peuvent toutefois être adoptés, y compris la juxtaposition des tas. Par temps sec, on donne en général aux tas une section trapézoïdale, dont la largeur au sommet dépend de la largeur de la base et de la pente du talus, qui est d'environ 30° par rapport à la verticale. Des meules à faces latérales verticales donnent des résultats satisfaisants lorsque les ordures n'ont pas été broyées et qu'elles peuvent être entassées de cette manière sans augmentation excessive des frais. Par temps pluvieux, la section transversale du tas doit être plutôt semi-circulaire ou arrondie, comme celle d'une meule de foin, afin que l'eau puisse s'écouler, et la hauteur peut être alors légèrement augmentée ; elle dépendra en partie de la largeur maximum.

Pour les silos très allongés que l'on utilise dans le compostage de grandes quantités d'ordures urbaines, on peut adopter n'importe quelle longueur.

Ils peuvent être allongés progressivement en ajoutant chaque jour les nouvelles livraisons à la suite des ordures accumulées la veille. Après quelques jours de décomposition, les matières peuvent être, si on le désire, réunies en un seul tas. La disposition de ces silos sera conçue de manière à faciliter les manutentions et à utiliser au mieux l'aire disponible.

Suivant leur nature et leur tassement, les ordures en décomposition perdent de 40 à 80 % de leur volume initial. En général, le compost fini ne pèse plus que 50 à 80 % du poids initial après enlèvement des matières récupérables et non compostables ; cette diminution dépend dans chaque cas de la nature des ordures et de la perte d'humidité. Si les matières brutes contiennent des quantités importantes de substances organiques, la perte de poids est beaucoup plus grande que lorsque la teneur en minéraux et en cendres est élevée.

Les quantités quotidiennes de matières usées produites par les villages et les exploitations agricoles sont généralement trop faibles pour permettre l'utilisation satisfaisante de silos. En pareils cas, on peut former des meules de forme circulaire ou rectangulaire de 2,4 à 3,6 m de diamètre ou de 1,8 à 2,4 m de côté respectivement, dont le dessus sera plat (par temps sec) ou arrondi comme celui d'une meule de paille (par temps pluvieux). La hauteur des tas plats peut être de 0,9 à 1,5 m et celle des tas coniques de 1,2 à 1,8 m, selon la nature des ordures et la température de l'air. Il est préférable de constituer les tas en une seule fois ; en cas de besoin, on peut cependant ajouter successivement les ordures produites pendant deux à trois journées. Il est alors nécessaire de conserver les excréta jusqu'au moment où le tas sera prêt à les recevoir.

Quand on mélange aux ordures des excréta humains solides ou liquides, deux méthodes d'antioisement sont d'usage courant. La première, qui comporte diverses variantes, consiste à creuser une tranchée ou un trou au centre du tas et à y verser les excréments, que l'on recouvre ensuite d'autres matières compostables ; les hautes températures qui règnent à l'intérieur du tas assureront la destruction des germes pathogènes. Il peut être bon de laisser les ordures se décomposer d'abord pendant deux à quatre jours, puis d'ouvrir ou de retourner le tas et de déverser les matières fécales au milieu. On obtient de cette façon un échauffement plus considérable avant l'adjonction des excréta, qui atteindront donc plus rapidement une haute température. Lorsque la quantité d'excreta dépasse la proportion souhaitable pour un compostage initial satisfaisant, on peut les ajouter en deux fois : la deuxième moitié est introduite lorsqu'on retourne le tas, c'est-à-dire à un moment où la première aura été déjà bien chauffée et partiellement stabilisée. Le degré d'humidité et le rapport C/N indiqueront si ces additions ultérieures sont possibles.

La seconde méthode de mélange consiste à constituer un tas comprenant des couches alternées d'ordures et d'excréments. On commence par disposer sur le sol une couche d'ordures d'au moins 15 à 22 cm d'épaisseur, et on

relève les bords jusqu'à environ 45 cm au-dessus du sol, de manière à former un creux à l'intérieur du tas. Une couche d'excreta de 5 cm d'épaisseur est ensuite étendue dans ce creux jusqu'à une distance d'environ 45 cm des bords extérieurs, ce qui permet d'assurer la destruction des germes pathogènes par la chaleur et de ne pas exposer les excréta à l'air libre. Puis on ajoute de la même manière des couches successives d'ordures et d'excreta jusqu'à ce que le tas ait atteint la hauteur voulue. On veillera à maintenir le degré d'humidité dans les limites convenables. Le tas doit être retourné et aéré après quelques jours, au moment où la température commencera à baisser, ou si le retournement est imposé par une autre nécessité, telle que la lutte contre les mouches.

On peut également ajouter des excréta aux ordures broyées dans un malaxeur rotatif. Le mélange est ensuite mis à composter en tas ou en meules. Ces tas ou meules sont recouverts d'une couche de 5 à 8 cm de compost stabilisé ou de grillages en vue d'empêcher la reproduction des mouches et ils sont aérés au bout de 4 à 6 jours.

Fosses

Les mêmes méthodes peuvent être utilisées pour antoiser le compost et pour ajouter les excréta, lorsque les matières sont placées dans des fosses peu profondes au lieu d'être posées à même le sol. Dans ce cas, les parois et le fond de la fosse sont revêtus de briques ou de maçonnerie ou la terre est battue et tassée. Les ordures sont empilées jusqu'à ce qu'elles dépassent le niveau du sol de 30 cm environ, ce qui donne un tas de 0,9 à 1,4 m d'épaisseur. Les matières peuvent être retournées dans la fosse aussi fréquemment qu'il le faut pour obtenir les hautes températures et les conditions d'aérobiose requises. Quand on utilise des fosses, la surface exposée à l'air se trouve réduite et les parois et le fond de la fosse assurent un certain isolement qui protège contre les pertes de chaleur et d'humidité. On peut également y déverser les excréta solides ou liquides ou les laisser s'écouler de réservoirs placés sur des charrettes.

Les fosses du type représenté dans la figure 5 sont pourvues d'un revêtement intérieur et possèdent habituellement une cheminée et des tranchées ou un fond poreux, afin d'assurer l'aération et l'écoulement de l'effluent. On peut utiliser des tranchées de même forme sans dispositif d'aération et de drainage et sans revêtement de maçonnerie. Toutefois, en l'absence de revêtement intérieur, les parois risquent de s'effriter et la forme de la fosse devient alors irrégulière. Lorsque les travaux se font manuellement, le retournement et la manipulation des matières dans la fosse ne coûtent pas plus cher que si les tas sont disposés à la surface du sol. Au contraire, lorsque ces opérations sont mécanisées, l'amoncellement en surface est d'un prix de revient inférieur, sauf peut-être dans le cas de certaines fosses très perfectionnées pourvues d'un dispositif spécial pour le retournement.

Acharya¹ préconise des fosses d'environ 0,9 m de profondeur, dans lesquelles on entretient des conditions d'aérobiose et des températures élevées pendant les quelques premiers jours, pour laisser ensuite le processus se dérouler en anaérobiose pendant quatre à six mois. Les ordures, y compris les excréta, sont disposées dans la fosse en couches successives de la manière décrite précédemment avec une couche d'ordures d'au moins 15 à 22 cm d'épaisseur au sommet. La quantité d'oxygène emprisonné est suffisante pour que les organismes aérobies produisent une température élevée pendant les premiers jours. Il semble que cette haute température se maintienne pendant deux semaines environ grâce aux propriétés isolantes des tas de ce type, et malgré l'installation rapide de l'anaérobiose. La masse reste en fermentation essentiellement anaérobie pendant trois mois au moins sans être retournée. Au fur et à mesure qu'elle s'affaisse, on la recouvre parfois d'une nouvelle couche d'ordures et d'excréta pour conserver l'épaisseur désirée. Après le passage à l'anaérobiose, on peut recouvrir le tas de poussière ou d'un autre revêtement analogue pour absorber l'azote qui s'en échappe, retenir l'humidité et éviter la reproduction des mouches. Dans ce système, la couche supérieure, jusqu'à une profondeur de 10-15 cm ne fermente généralement pas bien. En outre, on ne peut avoir la même certitude d'obtenir des températures suffisamment élevées et uniformes pour détruire les germes pathogènes. Enfin, la fermentation anaérobie pose le problème du pullulement des mouches et de la production d'odeurs fétides.

Pour le compostage anaérobie, Scott⁶⁸ a utilisé des fosses revêtues de maçonnerie ayant 1,8 à 3 m de profondeur. Il a constaté qu'il est impossible de détruire à coup sûr les œufs de *A. lumbricoides* sans avoir préalablement obtenu les températures élevées et uniformes qui accompagnent la décomposition aérobie. C'est pourquoi il commençait par mettre les matières à composter pendant quelques jours en tas aérobies retournés une ou plusieurs fois avant de les disposer dans des fosses assez profondes en vue d'une digestion anaérobie. La masse était fortement tassée dans les fosses afin de réduire au minimum les interstices et la quantité d'air emprisonné; elle reposait ensuite sans autre manipulation pendant 4 à 6 mois.

Les fosses ne donnent pas de bons résultats dans les régions où la nappe phréatique est peu profonde. Si on les utilise malgré cet inconvénient, il faut assurer le drainage du fond et prendre les dispositions nécessaires pour empêcher les eaux de ruissellement de pénétrer.

On peut se demander si les fosses présentent vraiment des avantages par rapport aux tas disposés à même le sol et aérés par retournement. L'économie de main-d'œuvre qu'elles apportent risque d'être obtenue au prix d'un plus grand pullulement des mouches, d'un plus fort dégagement d'odeurs, et d'une incertitude accrue sur la destruction des germes pathogènes. En sens inverse, il ressort d'expériences faites dans l'Inde que les

éléments nutritifs se conservent mieux lorsque le compostage s'effectue dans des fosses. Toutefois, comme on l'indiquera plus loin (voir page 94), il n'est pas entièrement prouvé que le compostage anaérobie permette de retenir une quantité beaucoup plus forte d'azote que le compostage aérobie, si ce dernier est complété par certaines autres techniques de conservation de l'azote.

Le digesteur à aération mécanique, qui a été décrit précédemment, est sans grand intérêt économique pour le traitement des ordures et des excréments dans les villages. Cependant, ces appareils ont été utilisés avec succès pour le compostage des ordures dans des localités où l'on recherchait une stabilisation rapide. Il y a de sérieuses raisons de douter que les digesteurs mécaniques assurent un compostage plus économique que la mise en tas dans les villes où des quantités considérables d'ordures doivent être traitées. Cette formule trouvera sans doute son emploi le plus indiqué dans les régions dont le climat est trop inclément pour permettre le compostage en plein air.

Température

La température est un facteur important, surtout dans le compostage aérobie. On a indiqué précédemment que la fermentation aérobie s'accompagne d'un dégagement considérable de chaleur. Etant donné que la masse d'ordures possède d'assez bonnes propriétés isolantes, elle est capable, si son volume est suffisamment grand, de retenir la chaleur dégagée par cette réaction biologique exothermique, et des températures élevées seront ainsi obtenues.

Ces températures élevées sont indispensables pour la destruction des germes pathogènes et des graines de mauvaises herbes. En outre, la décomposition s'effectue beaucoup plus rapidement aux températures convenant aux bactéries thermophiles. L'intervalle optimum est de 50 à 70°C, et les meilleurs résultats sont habituellement obtenus au voisinage de 60°C. Certains producteurs de compost (Dano Corporation) considèrent que les températures allant de 50 à 60°C sont les plus favorables, tandis que d'autres ont obtenu des résultats excellents entre 60 et 70°C. Etant donné qu'un petit nombre seulement d'organismes thermophiles contribuent effectivement à la décomposition lorsque la température s'élève au-dessus de 70°C, il est souhaitable de ne pas dépasser ce niveau pendant des périodes prolongées.

Le Service de Santé publique des Etats-Unis⁷⁶ a publié un rapport sur des expériences de compostage effectuées dans des installations pourvues d'un système d'aération mécanique et dans lesquelles la production de CO₂ et la perte d'humidité ont été mesurées à différentes températures, afin de déterminer le degré de décomposition. La production de CO₂ a été calculée d'après la formule : $\log Y = 0,01417 X_F - 1,9101$, où Y est la

production de CO_2 et X_F la température en degrés Fahrenheit.^a De même, la perte d'humidité (Z) a été calculée d'après la formule $\log Z = 0,008096 X_F - 1,1953$, où X_F est la température en degrés Fahrenheit.^a La température maximum obtenue au cours de ces expériences a été de $159,5^\circ\text{F}$ ($70,8^\circ\text{C}$). L'expérience fait ressortir une augmentation marquée du degré de décomposition aux températures les plus élevées.

Bien qu'il ait été établi que les œufs de *A. lumbricoides* et les kystes de *Ent. histolytica* sont détruits rapidement au-dessus de 50°C , on a constaté que ces œufs et ces kystes pouvaient survivre pendant plusieurs jours dans des tas de compost dont la température intérieure dépassait 50°C .⁶⁸ Etant donné qu'il faut se réserver une marge de sécurité sur ce point, et qu'il est facile d'obtenir des températures élevées pendant une grande partie de la période de décomposition active, l'ensemble des matières devrait être maintenu à 60°C au moins.

Dans certains cas, des producteurs de compost évitent d'opérer pendant longtemps à ces températures élevées, qui ont tendance à augmenter les pertes d'azote par suite de l'évaporation de l'ammoniac, qui se produit lorsque le rapport C/N est faible. On montrera plus loin qu'il existe d'autres moyens de diminuer la perte d'azote sans abaisser la température. L'inconvénient des pertes d'azote, d'ailleurs faibles, dues à la température élevée est compensé par les avantages que constituent la destruction des germes pathogènes et des graines de mauvaises herbes, la possibilité d'éviter le pullulement des mouches et la certitude d'une meilleure décomposition.

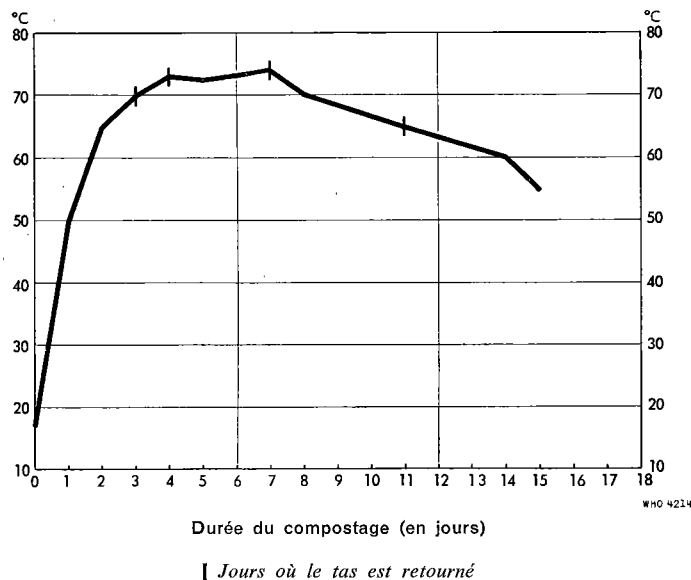
La figure 6 reproduit une courbe typique de la température régnant à l'intérieur d'un tas d'ordures broyées. La courbe ne reflète pas les baisses minimales qui se produisent lors du retournement des tas et qui sont rapidement compensées. En général, on atteint 45 à 50°C dans les premières 24 heures et 60 - 70°C au bout de 2 à 5 jours. La baisse finale de la température est moins brusque que son augmentation initiale, ce qui indique une bonne stabilisation. Une baisse de température intervenant avant la stabilisation signifie que des conditions d'anaérobiose s'établissent à l'intérieur du tas et qu'une aération s'impose. En effet, les températures élevées ne se maintiennent pas lorsque la fermentation devient anaérobie.^b La courbe varie quelque peu en différents points de la masse suivant les dimensions du tas, la température ambiante, le degré d'humidité, l'aération et la nature des matières utilisées. Néanmoins, c'est l'approvisionnement en oxygène

^a Si la température est exprimée en degrés centigrade (X_C), ces deux formules sont : $\log Y = 0,025506 X_C - 1,45666$; $\log Z = 0,0145728 X_C - 0,936228$.

^b Il est possible d'obtenir, pendant quelque temps, de hautes températures dans une partie d'un tas fermentant en anaérobiose lorsque le degré d'humidité n'est ni assez fort pour que la décomposition s'effectue normalement, ni assez faible pour l'empêcher complètement. L'échauffement et le dégagement de combustibles volatils déclenchent une combustion spontanée. Toutefois, cette situation n'est pas propice à une bonne décomposition et ce n'est pas le genre d'échauffement que l'on recherche dans un compostage rationnel.

qui constitue le facteur le plus important dans le maintien de températures élevées pendant la décomposition.

FIG. 6. COURBE TYPIQUE DE LA TEMPÉRATURE DANS UN VOLUME CONSIDÉRABLE D'ORDURES URBAINES MÊLÉES EN COMPOSTAGE AÉROBIE *



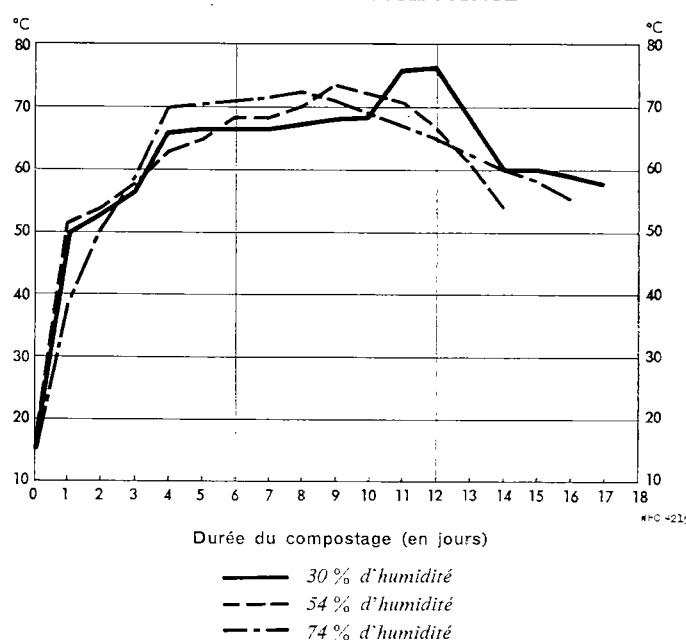
* D'après les études faites par l'Université de Californie

Comme on l'a dit plus haut, on peut faire des tas plus grands pour obtenir des températures élevées par temps froid, ou plus petits pour éviter un échauffement excessif par temps chaud. L'expérience a prouvé que le retournement ou l'aération ne sont pas des moyens très efficaces pour libérer la chaleur d'un tas de compost dont la température s'est élevée (dépassant 60-75°C) au point d'inhiber l'activité bactérienne. En effet, si la décomposition est active, la température, après avoir baissé légèrement pendant le retournement, remonte à son niveau antérieur au bout de 2 ou 3 heures. On n'arrive pas davantage à provoquer un refroidissement appréciable en arrosant le tas, à moins de le noyer complètement. L'effet des dimensions sur la température est illustré par l'expérience suivante, faite sous une température extérieure de 15 à 20°C : Un tas de 1,5 m de hauteur dont la masse atteignait 70°C fut ramené à 0,6 m de hauteur : la température tomba à 65°C en 3 heures. Trois jours plus tard, le tas fut porté de nouveau à 1,5 m de hauteur et, en 24 heures, la température intérieure remonta à 70°C.

Dans les tas dont les dimensions sont suffisantes pour empêcher les pertes de chaleur, la température des points voisins de la surface ne varie guère avec celle de l'air ambiant. Toutefois, des vents violents et une forte évaporation entraînent une baisse de température près de la surface exposée au vent.

Des variations du degré d'humidité comprises entre 30 et 75 % sont sans grand effet sur la température maximum à l'intérieur du tas, ainsi que le montre la figure 7, extraite des études faites par l'Université de Californie.⁸¹ L'échauffement initial semble un peu plus rapide à 30-50 % d'humidité qu'à 73 %.

FIG. 7. EFFET DU DEGRÉ D'HUMIDITÉ SUR LA TEMPÉRATURE D'UNE MASSE EN COMPOSTAGE *



* D'après les études faites par l'Université de Californie

Ces études ont cependant fait apparaître une corrélation importante et significative entre l'humidité et la répartition des températures à l'intérieur du tas. La température de la couche superficielle est plus élevée, et la zone des hautes températures se rapproche davantage de la surface lorsque l'humidité est plus forte. Ainsi, dans les expériences effectuées par l'Université de Californie,⁸¹ sous une température ambiante comprise entre 10 et 25°C, la zone d'échauffement maximum s'étendait jusqu'à environ 2,5 cm de la surface dans un tas dont l'humidité était de 61 %,

alors que dans un tas contenant 40 % d'humidité, cette même zone commençait à 15 cm au-dessous de la surface. On peut ajouter, pour souligner la portée de cet exemple, que, dans le tas contenant 61 % d'humidité, la température atteignait 48°C à 6-12 mm de la surface, 58°C à 5 cm et 68°C (température intérieure maximum) à 10 cm. Dans le tas contenant 40 % d'humidité, l'isotherme 50°C passait à 8 cm de la surface, celle de 60°C à 13 cm et celle de 70°C (température maximum) à 15 cm. La température au fond du tas est en général inférieure au maximum, mais supérieure à celle du sommet et des côtés.

Les études de Golueke²² sur le compostage du fumier de vache et de porc font également ressortir des variations considérables dans les températures des couches extérieures du tas.

Le tableau 7 extrait des études de van Vuren,⁸² donne les moyennes de quatre relevés quotidiens de la température en des points divers de fosses de compostage ayant les unes 0,6 m et les autres 1,2 m de profondeur, et dans lesquelles le compost était retourné chaque jour.

On voit qu'on a obtenu des températures plus élevées dans la fosse la plus profonde, en même temps qu'une meilleure répartition de la chaleur, et que la proportion des matières soumises simultanément à une température élevée y était plus considérable. Ainsi, le volume effectif de la masse dégageant de la chaleur constitue un facteur important pour la production de températures suffisamment hautes.

Le broyage ou la pulvérisation des matières, en donnant une plus grande homogénéité, contribue également à assurer une meilleure répartition des températures et à diminuer les pertes de chaleur.

Les matières dont le rapport C/N est élevé ou qui contiennent de grandes quantités de cendres et de substances minérales s'échauffent en général plus lentement.

L'aération, qui permet d'entretenir l'aérobiose dans le tas de compost, est une condition indispensable pour arriver à des températures élevées. Lorsque l'anaérobiose s'installe, la température baisse rapidement. Même les petites zones où la fermentation devient anaérobie ont des températures plus basses que les parties avoisinantes du tas où l'aérobiose se maintient.

Aération

Comme nous l'avons indiqué précédemment, il faut aérer la masse en compostage pour entretenir l'aérobiose et les températures élevées et obtenir la décomposition rapide et inodore qui caractérise cette variante du processus. L'aération sert également à réduire l'humidité initiale lorsqu'elle était trop élevée. Diverses techniques ont été employées avec plus ou moins de succès. La méthode la plus courante, qui s'applique au compostage en tas, consiste à retourner la masse.

**TABLEAU 7. TEMPÉRATURES PRISES A DIFFÉRENTS POINTS
DANS DEUX FOSSES A COMPOST**

Paroi latérale de la fosse		Fond de la fosse										
		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
G	X	38,9	51,1	48,3	62,2	51,1	58,9	60,0	59,4	61,1	47,8	62,8 °C
	Y	29,4	26,1	34,4	28,9	21,7	28,9	27,2	23,9	33,3	23,3	35,6 °C
F	X	60,0	55,6	65,6	72,2	52,8	69,4	62,8	70,6	67,8	58,3	71,1 °C
	Y	34,4	30,6	40,6	42,2	28,9	36,7	37,2	31,7	42,2	33,3	47,2 °C
E	X	67,8	70,0	68,9	71,7	63,3	70,0	66,7	70,6	71,7	65,0	73,9 °C
	Y	36,7	43,9	44,4	49,4	33,9	42,8	47,8	44,4	48,9	47,8	56,1 °C
D	X	70,6	77,8	72,2	71,1	70,6	66,1	67,8	68,9	68,9	68,9	76,1 °C
	Y	40,0	62,8	62,2	58,9	36,1	45,6	65,6	56,7	56,7	57,2	66,7 °C
C	X	57,2	73,9	73,3	66,1	66,7	66,7	62,8	66,7	66,7	60,6	70,6 °C
	Y	43,3	63,9	62,2	55,0	58,3	54,4	63,3	60,6	59,4	55,6	65,6 °C
B	X	57,8	70,0	67,2	61,7	59,4	62,8	60,6	63,9	61,7	58,9	68,9 °C
	Y	52,8	55,6	61,1	45,0	52,2	51,7	58,3	53,9	53,9	52,2	58,9 °C
A	X	56,1	68,9	65,6	60,6	62,8	61,1	56,1	58,9	58,9	57,8	62,8 °C
	Y	47,8	50,6	56,1	44,4	47,8	46,7	48,9	51,7	51,1	48,3	58,3 °C

X = températures prises dans la fosse profonde de 1,20 m

Y = températures prises dans la fosse profonde de 0,60 m

A - G = tranches horizontales dans lesquelles les températures ont été prises ; l'épaisseur des tranches était de 10 cm dans la fosse de 1,20 m et de 5 cm dans la fosse de 60 cm

a - k = tranches verticales et longitudinales dans lesquelles les températures ont été prises la largeur des tranches était d'environ 13 cm dans les deux fosses.

D'après van Vuren ; ¹² reproduit avec l'aimable autorisation de Faber and Faber Ltd, Londres.

Quand les quantités traitées sont faibles, par exemple dans les villages et dans les fermes, le compost, en tas ou en fosse, est en général retourné à la fourche. C'est dans les grandes installations à l'échelle municipale que la mécanisation présente le plus d'intérêt économique. Le point le plus important, en dehors de l'aération, est de faire en sorte que les couches

extérieures du tas se retrouvent au centre, où elles seront soumises aux températures élevées. Ce brassage ne présente aucune difficulté quand on travaille à la fourche : si les tas sont à même le sol, on les refait simplement à côté, en mettant à l'intérieur du nouveau tas les matières qui se trouvaient à l'extérieur de l'ancien. Si le compost se fait en fosses ou en tranchées, on transporte le contenu d'une fosse dans une autre ou, s'il reste un peu d'espace libre au bout de la fosse, on retourne la masse à l'intérieur de la fosse. La perte de volume au cours de la stabilisation facilite le retournement à l'intérieur de la fosse. On peut également profiter de ces manipulations pour réunir plusieurs tas en un seul, surtout si l'on pratique le compostage prolongé.

L'intérêt accru qu'a suscité le compostage comme méthode d'évacuation des ordures a conduit à mettre au point des méthodes mécanisées pour retourner les tas longitudinaux dans les usines importantes. On se sert de diverses machines, qui sont en général des adaptations de matériel normalement destiné à d'autres usages. Une version modifiée du chargeur auto-propulsé Barber-Green est utilisée dans une usine de compostage pour retourner un mélange de fumier et de paille servant à la culture des champignons. On a obtenu de bons résultats avec un bulldozer dont la lame ou la benne était remplacée par de grandes fourches à dents écartées capables de ramasser et de retourner un tas. De même, on utilise un tracteur ameulonneur modifié. Un autre procédé consiste à retourner le compost au moyen d'un bulldozer dont le doget déverse les matières dans un épandeur de fumier monté sur un camion, qui les dépose mécaniquement en une nouvelle rangée. Les études faites en Nouvelle-Zélande ont amené à proposer l'emploi de grues mobiles ou de drag-lines manœuvrant des bennes presseuses à grappin. Cet équipement serait particulièrement intéressant pour retourner le compost en fosse.

La Compost Corporation of America signale qu'elle envisage d'utiliser un transporteur mobile, à auto-propulsion et auto-alimentation, pour aérer et déplacer les rangées de compost et pour contrôler l'humidité et la température. Un réservoir d'eau monté sur la machine permet en cas de besoin d'augmenter l'humidité en arrosant la masse pendant qu'on la retourne. Ce matériel doit permettre à un seul opérateur de manipuler en une heure plus de 100 tonnes de compost disposé en rangées. Pareil dispositif à gros débit élimine tout travail manuel et assurera, pour une dépense d'exploitation réduite, un contrôle très étroit de l'état des rangées de compost. Il est prévu qu'en retournant les matières pour les aérer on les déplacera en direction des locaux où le produit fini doit être entreposé et préparé pour la vente.

Une machine auto-propulsée, rappelant les chasse-neige rotatifs modernes, pourrait être construite pour se déplacer à cheval sur les rangées ou pour les longer en ramassant le compost avec des godets rotatifs de forme conique qui retourneraient vers le centre les matières se trouvant à l'extérieur

et les projetteraient contre un moule de tôle. Ce moule serait conçu de manière à recevoir le compost soulevé par les godets rotatifs et à refaire les tas aux mêmes emplacements ou juste à côté. L'emploi d'une charrue

FIG. 8. USINE DE COMPOSTAGE A DUMFRIES (ÉCOSSE) : FOSSES, PONT ROULANT ET BENNE PRENEUSE



Reproduit avec l'aimable autorisation de
Lady Howard, Albert Howard Foundation
of Organic Husbandry, Kent, Angleterre

rotative présenterait bien des avantages pour retourner les tas d'ordures préalablement pulvérisées ou dilacérées. Il ne serait pas difficile de mettre au point d'autres types de machines permettant d'accomplir le même travail.

Pour retourner le compost en fosses ou en cuves, on pourrait creuser, sur un terrain horizontal ou légèrement en pente, une longue tranchée

continue de 3 m de large et de 1,20 m de profondeur, équivalent à une série de cuves. Une fourche mécanique montée sur rails se déplacerait le long de la tranchée pour retourner le compost. Les ordures seraient déposées à une extrémité et chaque retournement les ferait avancer vers l'autre extrémité, où elles arriveraient stabilisées. A Kirkconnel (Dumfries, Ecosse), on utilise un pont roulant avec une benne preneuse (fig. 8) pour charger, décharger et retourner le compost dans les fosses. De nombreuses autres méthodes d'aération sont possibles. A l'heure actuelle, il semble que la plus économique pour les grandes installations est de constituer des silos et de les retourner au moyen d'un appareil auto-propulsé qui les reforme et qui permet à un seul ouvrier de retourner plusieurs centaines de tonnes par jour pour une dépense unitaire très réduite.

On a essayé d'aérer les meules par la base et d'éliminer l'excès d'humidité en disposant des drains en tuile au fond de cuves ou de fosses pavées de briques sans joints. Cette méthode donne bien une certaine ventilation par la base, mais la structure d'une meule d'ordures — surtout si elles ont été broyées — se prête mal à une circulation d'air à l'intérieur. Des conditions d'aérobiose en surface peuvent parfaitement coexister avec l'anaérobiose à quelques centimètres de profondeur. De plus, puisque l'intérieur de la meule est chaud, les gaz qui y sont produits (gaz carbonique et autres) ont tendance à refluer vers le dehors, et donc d'empêcher l'air d'entrer. Les matières non broyées contenant de la paille en gros brins ou d'autres éléments grossiers absorbent l'air par les côtés et par la base beaucoup mieux que les ordures dilacérées, mais cette absorption reste néanmoins très faible. Dans certains cas, on fait passer un courant d'air pulsé par le fond de la fosse, qui est perforé à cet effet. Mais cette technique n'est pas particulièrement efficace, car les détritiques ne constituent pas une masse dans laquelle l'air puisse circuler et se répartir de manière uniforme.

On utilise également des cheminées cylindriques en tôle perforée ou en treillis métallique, d'un diamètre de 10 à 20 cm, et placées à 0,90 ou 1,50 m l'une de l'autre dans les meules, les fosses ou les silos de compost. Les expériences faites à l'Université de Californie ont montré que l'aération assurée par ces cheminées est si limitée, du fait de la consistance de la masse en décomposition, que leur emploi ne se justifie guère. D'autres chercheurs semblent cependant avoir obtenu des résultats satisfaisants avec cette méthode.

A Baden-Baden, le compost en silos est aéré au moyen d'un châssis en forme de V renversé (un tunnel parcourt ainsi toute la longueur du silo) sur lequel les matières sont entassées (voir fig. 4 B, page 59). L'air qui se trouve à l'intérieur de ces châssis diffuse dans le compost. La masse n'est pas retournée et, de ce fait, échappe en grande partie aux hautes températures.

Dans certains digesteurs mécaniques, on aère en forçant de l'air dans les détritiques par des tuyaux perforés, des doubles parois, ou encore par

des orifices pratiqués dans des bras rotatifs creux qui tournent dans la masse. D'autres digesteurs assurent l'aération en mélangeant les matières en présence d'air au moyen d'agitateurs à vrilles ou à palettes. Lorsque la masse est brassée lentement dans un digesteur, la température est plus ou moins uniforme, et il n'y a plus à se soucier d'amener les couches extérieures plus froides aux températures élevées de l'intérieur.

La périodicité de l'aération ou du retournement, de même que l'intensité de l'aération et le nombre total de retournements dépendent essentiellement de l'humidité et de la nature des matières traitées, surtout du premier de ces deux facteurs. Une forte humidité rend la masse moins poreuse et, en amollissant les détritiques, facilite leur tassement, ce qui diminue encore les interstices ou les vides par où l'air pourrait pénétrer. D'autre part, si le rapport C/N est élevé ou si des quantités considérables de cendres ou d'autres matières inertes sont présentes, l'aération n'a pas besoin d'être aussi fréquente que pour des matières qui se décomposent plus activement et plus vite.

Le procédé de Bangalore,¹ mis au point dans l'Inde, comporte peu d'aération : on considère que l'air emprisonné à l'origine dans la masse mise en fosse suffit pour entretenir des températures élevées pendant plusieurs jours. Ensuite, les détritiques subissent apparemment une digestion anaérobie pendant plusieurs mois jusqu'au moment où ils sont relativement bien décomposés. Cette méthode a l'avantage d'économiser la manutention, mais elle pose le problème des odeurs, de la destruction des germes pathogènes et de la lutte contre les mouches.

Howard (utilisant le procédé d'Indore),³³ Scott,²⁸ van Vuren,⁷² Scharff,⁶⁶ Stovroff,⁷⁵ Weststrate⁸⁹ et d'autres retournent le compost, qu'il soit en fosse ou en meules, de une à quatre ou cinq fois sur une période de 1 à 6 mois. La température augmente immédiatement après chaque retournement jusqu'à stabilisation complète. Si on laisse s'écouler un long intervalle entre deux retournements ou aérations, la décomposition active est retardée par l'installation de l'anaérobiose et la stabilisation demande beaucoup plus de temps.

Les études faites à l'Université de Californie⁸¹ montrent qu'en retournant le compost assez fréquemment pendant les 10 ou 15 premiers jours, on obtient à peu près le même degré de stabilisation qu'avec le même nombre de retournements répartis sur une période plus longue. Une meilleure aération pendant les premières phases de la décomposition intensifie l'activité des micro-organismes et abrège la période de décomposition active, réduisant ainsi le temps et l'espace nécessaires au compostage. Il va sans dire que si le compostage doit être essentiellement anaérobie, ce qui vient d'être dit du nombre des manutentions ne s'applique pas. Cependant, si l'on se propose d'entretenir, au moins partiellement, des conditions d'aérobiose et des températures élevées, il semble à peine plus difficile de retourner le compost aux intervalles nécessaires pour obtenir

une décomposition aérobie plus ou moins continue, que d'aérer à intervalles plus espacés mais répartis sur une période plus longue.

La quantité d'air disponible est fonction non seulement de la fréquence des retournements, mais aussi de l'humidité et de la consistance des matières. D'autre part, la quantité d'oxygène nécessaire à l'activité biologique dépend, dans une certaine mesure, de la quantité de substances nutritives présentes dans les déchets (en d'autres termes, un rapport C/N élevé ne permet pas de nourrir une flore aussi abondante). Il est donc impossible de fixer, pour une série de conditions différentes, des normes minimums applicables à la périodicité ou au nombre des retournements. Les études faites à l'Université de Californie sur le compostage de détritux ménagers (ordures ménagères, débris d'herbe coupée et de branches taillées, plus des quantités considérables de papier et d'autres déchets combustibles) montrent qu'on peut obtenir une décomposition rapide en appliquant le plan suivant.

Si l'humidité initiale est inférieure à 70 %, on retourne une première fois le troisième jour. Ensuite, jusqu'au dixième ou douzième jour :

Humidité de 60 à 70 % : retourner tous les deux jours, 4 à 5 fois

Humidité de 40 à 60 % : retourner tous les trois jours, 3 à 4 fois

Humidité inférieure à 40 % : ajouter de l'eau.

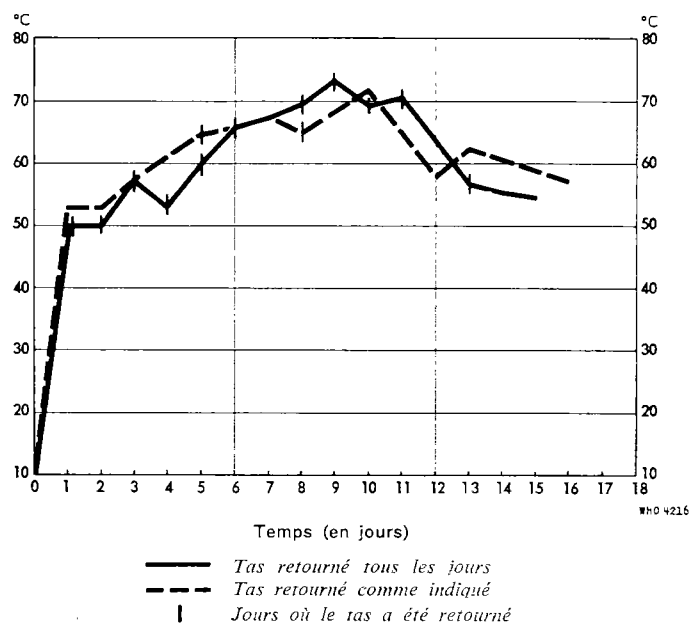
Lorsque l'humidité initiale est nettement supérieure à 70 % il convient de retourner tous les jours jusqu'à ce que ce chiffre soit ramené à moins de 70 % ; suivre ensuite le régime indiqué ci-dessus.

Ce plan assurera une décomposition rapide à des températures élevées. En retournant un peu moins souvent, on ralentit le compostage, mais on doit pouvoir éviter ainsi l'anaérobiose prononcée et les mauvaises odeurs. Lorsque le compost fini est conservé en grand tas avant d'être mis en sac, on peut parfois considérer que le transport sur le tas final tient lieu de dernier retournement. Il y a lieu de noter en outre que, si le régime indiqué ci-dessus a donné satisfaction pour les ordures mélangées auxquelles on avait affaire à Berkeley (Californie), une manutention moins fréquente peut suffire dans d'autres conditions. L'auteur a remarqué aux Pays-Bas et au Danemark que les tas de compost contenant environ 40 % d'humidité ne deviennent ni septiques ni fétides même lorsqu'on les retourne rarement (une fois toutes les 6 semaines). Quand on suit un certain plan d'aération, il n'est pas nécessaire de déterminer l'humidité dans chaque silo de compost. L'expérience permet rapidement d'apprécier la nécessité d'ajouter de l'eau ou de retourner les matières. On obtient de bons résultats en appliquant la recette pratique suivante : dès qu'on sent les odeurs fétides de la putréfaction anaérobie en fouillant le tas pour le retourner ou pour l'inspecter, retourner quotidiennement jusqu'à disparition de ces odeurs. Si complète que soit devenue l'anaérobiose, un retournement quotidien, qui réduit l'humidité et introduit de l'air, la fera disparaître. De même, il est quelque-

fois nécessaire de retourner la masse tous les jours pour empêcher le pullulement des mouches. Une baisse de température survenant au cours des 7 ou 10 premiers jours du compostage indique qu'il est nécessaire de retourner le tas pour l'aérer.

La figure 9 indique le rapport entre la périodicité des retournements et la température ; les mesures ont été prises sur deux tas semblables de compost et de diverses ordures broyées, à une température ambiante variant entre 10 et 25°C.⁸¹

FIG. 9. COURBES DE TEMPÉRATURES DE DEUX TAS SEMBLABLES D'ORDURES MÉLANGÉES, MONTRANT LE RAPPORT ENTRE LA PÉRIODICITÉ DES RETOURNEMENTS ET LA TEMPÉRATURE



Dans ce cas particulier, la température du tas retourné tous les jours est restée légèrement plus basse, pendant la majeure partie des 5 premières journées, que celle du tas retourné moins souvent. Généralement, la température diminue de 5 à 10°C au moment de la manutention, mais elle remonte à son niveau précédent au bout de 2 ou 3 heures.

Il semble que le retournement quotidien empêche la prolifération des moisissures et des actinomycètes, qui caractérise les tas brassés moins souvent. Dans le premier cas, ces organismes ne se développent que sporadiquement, tandis que dans les tas qu'on laisse reposer pendant 2 ou 3 jours, ils forment une couche épaisse et continue qui atteint son maximum au bout de 4 jours environ. Cet effet de la manutention journalière est

probablement dû au fait que ces micro-organismes sont exposés quotidiennement à l'action inhibitrice des températures qui règnent à l'intérieur du tas ; ils sont ainsi empêchés de s'accumuler dans les couches extérieures plus froides.

Pour autant qu'ils dépendent de la température et de l'humidité, les besoins en air peuvent être contrôlés avec précision dans les digesteurs aérés mécaniquement. Ces appareils étant fermés, le problème de la lutte contre les mouches ne se pose pratiquement pas.

En résumé, l'utilité d'éviter l'anaérobiose, l'entretien de températures élevées et la lutte contre les mouches sont les principaux facteurs à considérer pour fixer la politique d'aération.

Flore microbienne

Les matières compostables (ordures ménagères, déchets, excreta, fumier, boues d'égouts, détritux végétaux divers) contiennent normalement de nombreuses espèces différentes de bactéries, de champignons, de moisissures et d'autres organismes vivants. On ne possède que des connaissances très incomplètes sur la diversité des organismes représentés et sur les fonctions propres à chacun. Waksman^{85, 86, 87} et d'autres auteurs^{13, 21} ont montré, dans d'importantes études sur la microbiologie du compostage aérobie du fumier et d'autres matières organiques, que certains micro-organismes ont certaines fonctions spécifiques et qu'aucun d'entre eux, si actif soit-il, ne réussit aussi bien qu'un mélange de souches, à produire une décomposition rapide et satisfaisante. Il semble que la décomposition aérobie fait intervenir un plus grand nombre d'espèces de bactéries que la putréfaction anaérobie. Cependant, on est mal renseigné sur les espèces de bactéries qui jouent un rôle actif dans le compostage anaérobie, encore que plusieurs recherches aient été faites sur les bactéries associées à la digestion anaérobie des boues d'égouts. Sans doute doit-on retrouver en grande partie les mêmes espèces dans le compostage anaérobie et dans la digestion des boues d'égouts. Cependant, comme le degré d'humidité et la quantité de substances nutritives sont très différents dans les tas de compost et dans les boues, il faut s'attendre à des différences correspondantes dans les flores microbiennes.

Un grand nombre d'espèces sont donc nécessaires à la décomposition des diverses matières compostables. La variété nécessaire est généralement présente et ces organismes se développent bien lorsque les conditions de milieu sont satisfaisantes. La nature et l'abondance de la flore subissent d'ailleurs des changements importants au cours de la décomposition. Certaines espèces se multiplient rapidement au début, mais dépérissent au fur et à mesure que le milieu change et que d'autres organismes peuvent proliférer à leur tour. Ce sont probablement la température et la nature

des substances nutritives présentes qui exercent la plus grande influence sur la composition de la flore, à un moment donné. Le compostage aérobique est un processus dynamique qui résulte de l'action combinée et prolongée de bactéries, d'actinomycètes,^a de champignons et autres. Chaque flore est adaptée à un milieu particulier, pour une durée relativement limitée, et participe électivement à la décomposition de telle ou telle catégorie de matière organique, chacune complétant l'activité des autres. L'hétérogénéité de la flore fait pendant à celle des milieux complexes que constituent les matières en décomposition. L'apparition de flores successives traduit les changements constants du milieu sous l'influence de la température et des modifications incessantes du substrat, au fur et à mesure que les substances nutritives complexes sont dissociées en composés plus simples. Quant à la température, sauf pendant de courtes périodes, à l'occasion des retournements de la masse, elle augmente constamment avec l'activité biologique, jusqu'à ce que les pertes de chaleur équilibrent l'échauffement, ou que le compost soit bien stabilisé.

Dans le compostage aérobique, les variétés aérobies, strictes ou facultatives, de bactéries, d'actinomycètes et de champignons sont les plus actives. Au début du processus, les bactéries mésophiles prédominent de manière caractéristique, puis cèdent rapidement la place aux bactéries thermophiles, qui envahissent toutes les parties du tas où la température est satisfaisante c'est-à-dire, en fin de compte, la plus grande partie de la masse. Les champignons thermophiles apparaissent généralement au bout de 5 à 10 jours et les actinomycètes prennent de l'importance au cours des dernières phases. Sauf lorsque la température tombe, vers la fin de la période de compostage, les actinomycètes et les champignons se cantonnent dans une couche nettement définie, d'une épaisseur de 5 à 15 cm, située immédiatement sous la surface du tas. Certaines moisissures se développent également dans cette zone extérieure. A moins que l'on ne retourne le matériel très fréquemment et que l'on ne rende ainsi leur croissance impossible faute du temps et des conditions nécessaires, les populations de champignons et d'actinomycètes sont souvent assez abondantes pour donner à cette couche extérieure un net aspect blanc grisâtre. La délimitation, très accusée, vers le dehors et vers le dedans, de la couche dans laquelle les actinomycètes et les champignons se développent au cours de la période de compostage actif à température élevée est due au fait que ces organismes ne peuvent se développer aux hautes températures qui règnent à l'intérieur du tas. On a constaté que les actinomycètes et champignons thermophiles poussent à des températures variant entre 45 et 60°C. D'après les études faites à l'Université de Californie,⁸¹ la température de la couche extérieure dans laquelle ces organismes prédominent varie entre 48°C à la limite extérieure et 58°C à la limite intérieure. Leur développement est entravé lorsqu'on

^a Enumérés séparément des autres bactéries, en raison de leur rôle distinct dans le compostage.

retourne fréquemment les tas, comme il est parfois nécessaire de le faire pour lutter contre les mouches ; en effet, la couche extérieure plus froide est alors mélangée avec la masse intérieure avant que la germination ait pu progresser.

Nous ne chercherons pas ici à montrer en détail le rôle de certains organismes ou groupes d'organismes dans la décomposition des différentes matières. Diverses recherches ont indiqué qu'un grand nombre d'espèces de bactéries thermophiles semblent jouer un rôle important dans la décomposition des protéines et d'autres substances organiques faciles à dissocier. On doit apparemment leur attribuer toute l'intense activité caractéristique des quelques premiers jours pendant lesquels la température atteint 60 à 70°C et que des modifications importantes s'opèrent dans la nature du tas de compost. Celui-ci diminue alors radicalement de volume et change rapidement d'aspect. Ces bactéries prédominent jusqu'à la fin dans l'intérieur de la masse, où les températures inhibent la croissance des actinomycètes et des champignons. Dans toutes les expériences qu'ils ont faites avec des flores mixtes sur la thermogénèse dans la décomposition des plantes, Carlyle & Norman¹³ ont constaté que les bactéries constituent l'élément actif.

Bien qu'ils se confinent essentiellement dans les couches extérieures et ne deviennent actifs que vers la fin du compostage, les champignons et les actinomycètes jouent un rôle important dans la décomposition de la cellulose, des lignines et autres matières résistantes, qu'ils attaquent après avoir utilisé les substances plus faciles à décomposer. Certes, de nombreuses bactéries attaquent la cellulose ; cependant, dans les parties des tas de compost qui sont peuplées principalement de bactéries, le papier donne très peu de signes de décomposition, alors que dans les couches ou zones habitées par les actinomycètes et les champignons, il devient presque méconnaissable. Ces organismes détruisent activement la cellulose et la lignine vers la fin de la période de compostage, lorsque les températures ont déjà diminué et que la plus grande partie du tas commence à présenter des conditions favorables à leur développement. Il convient donc, pour faciliter cette action, de ne pas retourner le compost plus fréquemment qu'il n'est nécessaire à l'entretien de l'aérobiose et à la lutte contre les mouches. Parmi les actinomycètes, *Streptomyces* et *Micromonospora* sont les plus courantes dans les composts, surtout la dernière espèce nommée. Les champignons rencontrés dans les composts comprennent *Thermomyces* sp., *Penicillium dupontii* et *Aspergillus fumigatus*.

Il y a lieu de noter que, les organismes nécessaires au compostage étant généralement présents et entretenant le processus lorsque le milieu est favorable, il n'est pas nécessaire, pour exploiter une installation de compostage, de connaître à fond les caractéristiques des différents organismes. Toutefois, avec une connaissance plus détaillée il devrait être possible d'améliorer le processus et de le rendre plus économique.

Ensemencement

Les perfectionnements du compostage se sont accompagnés de nombreuses discussions sur l'importance d'inoculum spéciaux censés contenir plusieurs souches pures d'organismes cultivés en laboratoire ou d'autres facteurs biologiques essentiels à la décomposition des matières inorganiques et à la fixation de l'azote : « enzymes », « hormones », « organismes vivants préservés », « facteurs activés », « biocatalyseurs » etc. Plusieurs méthodes commerciales de compostage sont construites autour d'un inoculum spécial dont la formule est souvent tenue secrète par l'inventeur ou l'initiateur, qui prétend que ce produit est essentiel pour le bon fonctionnement du procédé. L'utilité et la valeur de tels produits ont toujours été discutables⁸⁴ et la plupart des études scientifiques indiquent très nettement qu'ils ne sont pas nécessaires.^{1, 23, 56, 68, 89}

Au surplus, cette conclusion semble logique puisque des bactéries sont toujours présentes en grand nombre dans les détritux organiques compostables (ordures ménagères, déchets, fumier, eaux usées, excréta, débris végétaux, etc.) et qu'elles ne peuvent en être éliminées que par des méthodes rigoureuses de stérilisation. De toute façon, le nombre initial de bactéries est rarement un facteur limitatif, pour autant que les conditions de milieu soient favorables : En effet, les bactéries indigènes, beaucoup mieux adaptées que les formes atténuées produites au laboratoire, se multiplient rapidement et le rythme du compostage dépend donc simplement des conditions du milieu.

Quant aux préparations spéciales d'enzymes, on peut dire que le nombre des enzymes qui participent à la décomposition est si grand, leur isolement et leur synthèse si difficiles et si coûteux, qu'on voit mal la portée pratique d'une méthode de compostage employant seulement ces substances, à supposer même que des préparations satisfaisantes puissent être mises au point. Il est inutile d'ajouter des enzymes aux matières brutes en compostage, car les bactéries présentes élaborent de manière efficace et rapide tous ceux qui sont nécessaires. On appelle couramment « hormones » les facteurs de croissance et les vitamines dont ont besoin les bactéries et d'autres organismes. Or les composants organiques des ordures mélangées mises à composter contiennent habituellement tous les facteurs de croissance et toutes les vitamines nécessaires pour la prolifération normale des micro-organismes, qui peuvent, au surplus, en faire la synthèse et produiront certainement les quantités suffisantes pour répondre à tous les besoins normaux dans une population microbienne mélangée. Les termes « biocatalyseurs » et « facteurs activés » s'appliquent couramment à divers produits biologiques qui sont censés activer et accélérer la décomposition et la stabilisation des matières organiques. Les recherches expérimentales sur la digestion des boues et le traitement des eaux d'égouts par des boues

« activées » montrent que l'un et l'autre de ces processus ne sont modifiés en rien par des biocatalyseurs.^{31, 50} Il est intéressant de noter que Bird⁹ a constaté, en étudiant une préparation commerciale, que celle-ci se composait presque uniquement de carbonate de calcium et contenait une flore bactérienne équivalente à celle qui contamine normalement ce genre de substances pulvérulentes.

Van Vuren⁸² cite des exemples d'amélioration du compostage obtenue grâce à ce qu'il appelle des « activateurs ». En fait, ces produits apportaient une substance qui n'existait pas dans le compost. Par exemple, la paille ou le papier, qui ne contiennent pas les substances nutritives nécessaires, ne se décomposent pas facilement lorsqu'ils sont à l'état pur ; mais lorsqu'on leur ajoute de l'azote et du phosphore, ils servent de source de carbone pour la décomposition. Il a été démontré qu'en ajoutant au sol du fumier stérile, on obtient finalement la même flore microbienne que si l'on avait ajouté du fumier contenant les mêmes substances nutritives et, en plus, une flore bactérienne importante. Ce phénomène s'explique par le fait que les bactéries présentes dans le sol se multiplient dès qu'elles trouvent les substances nutritives nécessaires.

Golueke et al.²³ ont étudié le compostage de détritrus mélangés et d'ordures avec adjonction de fumier de cheval, de compost, de terre et de cultures bactériennes spéciales préparées dans le commerce. Ils ont fait décomposer des lots analogues d'ordures avec ou sans addition de ces divers produits et ils ont constaté que, malgré leur richesse en bactéries, aucun de ces produits n'accélérait le compostage ou n'améliorait le produit final. Ils n'ont constaté aucune différence sensible dans les courbes de température ou dans la composition chimique du compost à différents stades du processus. L'absence d'effet des inoculums sur le cycle de compostage tient, d'une part, au fait que la population microbienne indigène est suffisante et d'autre part, à la nature même du processus. Lorsque le milieu lui convient, la flore indigène mixte se multiplie rapidement et le compostage n'est pas retardé. Une inoculation microbienne ne serait utile que si la population présente dans un état donné du milieu était incapable de se développer assez rapidement pour profiter pleinement des possibilités de prolifération offertes par ce milieu. En pareil cas, un décalage se produirait, que l'on pourrait combler en complétant la population initiale. Cependant, aucun décalage de cette nature n'a été observé au cours de ces expériences ni dans les opérations de compostage utilisant des ordures de composition usuelle, normalement riches en bactéries indigènes. Il semble que divers groupes d'organismes composant la flore mixte initiale restent inactifs jusqu'au moment où le milieu commence à se prêter à leur développement ; ils se mettent alors à proliférer et à jouer leur rôle dans les phases successives du processus de stabilisation. Le processus étant dynamique et chaque groupe d'organismes pouvant survivre dans un spectre assez large de conditions de milieu, une population peut entrer en activité alors qu'une

autre est encore florissante et qu'une troisième est en train de disparaître. En conséquence, lorsqu'un groupe donné de bactéries est capable de se multiplier au même rythme que le milieu évolue, tout apport extérieur d'organismes semblables serait superflu.

Si les matières compostables étaient stériles, ce qui n'est pratiquement jamais le cas dans les conditions normales, des inoculums microbiens seraient nécessaires. Cependant, le succès du compostage sans inoculum pratiqué aux Pays-Bas,⁸⁹ en Nouvelle-Zélande,⁵⁶ en Union Sud-Africaine,⁸² dans l'Inde,¹ en Chine,⁶⁸ aux Etats-Unis²³ et dans de nombreux autres pays, prouve de manière convaincante que l'apport de bactéries ou d'autres additifs ne correspond à aucune nécessité.

pH

Le pH initial des ordures ménagères, des détritits, du fumier et d'autres matières compostables est en général compris entre 5 et 7, à moins que les déchets ne contiennent des cendres ou autres substances fortement alcalines. Si les matières ont été en putréfaction avant d'être utilisées pour le compostage, le pH sera proche de la valeur inférieure. S'il est compris au départ entre 6 et 7, il diminue généralement un peu au cours des deux ou trois premiers jours de compostage aérobie, sous l'effet d'une certaine production d'acide. S'il ne dépasse pas 5 ou 5,5 à l'origine, il varie peu au cours de cette période. Au bout de deux à quatre jours, il commence généralement à augmenter, pour atteindre 8 ou 9 vers la fin du processus. Le contrôle du pH en cours de compostage est très rarement un problème tant que l'aérobiose se maintient. Par contre, des quantités considérables d'acides organiques sont élaborées par la fermentation anaérobie de lots de compost. En pareil cas, les cendres, les carbonates, la chaux ou d'autres substances alcalines feront fonction de tampon et empêcheront le pH de descendre trop bas. Cependant, il est rarement nécessaire d'ajouter des substances alcalines au cours de la décomposition aérobie ; elles risquent d'ailleurs de faire plus de mal que de bien, car la perte d'azote par formation d'ammoniac gazeux sera plus grande si l'alcalinité est élevée. Le pH optimum se trouvant entre 6,5 et 7,5 pour la plupart des organismes, il serait probablement utile de le maintenir à ce niveau. Cependant, le compostage étant nécessairement une opération qui se fait en gros, il faut s'attendre à de petites différences de pH.

Il semble qu'un pH initial compris entre 5 et 6 ne retarde pas sérieusement les premiers stades de l'activité biologique, puisque la décomposition active et les températures élevées apparaissent peu de temps après la mise en tas. Cependant, la température semble augmenter un peu plus rapidement lorsque le pH initial est d'environ 7 ou davantage. En pratique, les déchets normalement utilisés pour le compostage ne posent aucun problème de contrôle du pH.

Conditions climatiques

Les conditions climatiques et plus particulièrement la température, le vent et la pluie, ont une influence sur le compostage. On ne connaît pas exactement l'effet de la température ambiante, notamment le minimum au-dessous duquel la décomposition ne se produit plus de façon satisfaisante. Dans le nord de la Chine, Scott ⁶⁸ a obtenu de bons résultats en plein hiver en augmentant la masse des matériaux pendant la durée des froids, réduisant ainsi la perte de chaleur par unité de volume. Il a constaté qu'il fallait des tas d'environ 1600 kg (5 à 7 m³) en hiver contre 700 kg (2 à 3 m³) en été. On sait d'ailleurs que les tas de fumier de ferme se décomposent en entretenant des températures élevées en plein hiver.

Les déchets organiques ont un excellent pouvoir isolant. Comme on l'a montré plus haut (voir tableau 7, page 69), les températures enregistrées dans un tas de compost varient considérablement avec la profondeur : la différence peut atteindre plusieurs degrés centigrades par centimètre. Il est donc permis d'admettre que le compostage peut se faire dans des conditions satisfaisantes même par temps de gel, pour autant que la neige n'empêche pas la manutention ou ne se mélange pas avec le compost. Il ne serait probablement pas nécessaire de retourner les tas aussi souvent que lorsqu'il fait chaud ; en effet, la température mettrait plus de temps à remonter après chaque retournement puisque l'opération ramènerait au centre du tas des couches extérieures très froides.

Un fort vent diminue considérablement la température du côté du tas qui est exposé. Deux facteurs importants déterminent l'effet du vent sur la température : *a*) le volume des particules, dont dépendent la porosité et l'évaporation, et *b*) le degré d'humidité. Les ordures non broyées ou réduites en morceaux grossiers ont une porosité plus élevée et le vent pénètre plus facilement dans le tas ; l'évaporation est donc plus forte et lorsque les matières deviennent trop sèches, l'activité microbienne se trouve entravée. Si l'on broie en particules d'environ 5 cm au maximum, on obtient une masse plus homogène et moins facile à pénétrer. On peut aussi protéger le tas en mouillant complètement l'extérieur, surtout du côté du vent ; la zone de hautes températures peut alors se rapprocher davantage de la surface. Dans les régions à forts vents dominants, une solution possible consisterait à abriter les tas de compost derrière un brise-vents. Mais cette précaution est rarement nécessaire, car en augmentant les dimensions des tas et en les mouillant, on arrive très bien à entretenir les températures voulues et le retournement garantit que toute la masse sera exposée aux températures élevées. Bien entendu, le refroidissement et le séchage dus au vent sont négligeables lorsque le compost se fait en fosses ou en cuves, puisque la masse est alors protégée de tous les côtés, sauf au sommet, qu'il suffit de mouiller pour le protéger.

La pluie n'a généralement pas d'effet important sur le compostage, à condition que la partie supérieure des tas soit arrondie pour assurer le ruissellement de l'eau et que l'emplacement soit bien drainé, de telle sorte que l'eau ne séjourne pas autour des tas et ne s'y infiltre pas par le fond. Les fortes pluies accompagnées d'un vent violent peuvent pénétrer jusqu'à 30 ou 40 cm du côté exposé si les ordures sont broyées grossièrement mais lorsque les tas sont de grandes dimensions, il est facile de remédier à cette situation en les retournant.

Van Vuren⁵² et Golueke²² ont montré que la pluie n'abaisse pas fortement les températures, et que les légères diminutions enregistrées sont dues en partie à la baisse de la température de l'air ambiant qui accompagne les précipitations. Golueke a pu composter du fumier de bovins et de porc avec des résultats satisfaisants malgré de fortes pluies tombées les quatrième, cinquième, sixième et septième jours et suivies d'averses légères quotidiennes pendant le reste de la période de compostage.

Il faut éviter de retourner le compost sous la pluie, car il risque d'être complètement détrempé. Si le mauvais temps empêche de suivre le rythme de manutention prévu, il vaut mieux laisser les tas manquer d'air pendant quelque temps que de les exposer à être saturés d'eau. Dans les régions pluvieuses et lorsque les opérations de retournement sont mécanisées, on s'efforcera d'éviter la boue et les autres inconvénients de l'excès d'humidité en disposant les tas de compost sur un fond de béton, d'asphalte ou de pierre ou sur toute autre surface que l'on puisse drainer.

La pluie est plus gênante lorsque le compostage se fait en fosses ou en cuves. Le dessus des tas doit être bombé pour que l'eau s'écoule. Les côtés de la fosse laisseront néanmoins passer des infiltrations qui s'accumuleront au fond. Un bon drainage est donc nécessaire, afin que l'eau s'écoule et que sa pénétration dans le compost soit réduite au minimum. Dans les régions pluvieuses, les fosses doivent être revêtues de béton, de brique ou de maçonnerie et munies de drains en tuiles, ou encore recouvertes d'une toiture.

Par temps pluvieux, le broyage et le triage du matériel doivent se faire sous abri. Il y a lieu de prévoir des locaux pour entreposer les nouveaux arrivages pendant quelque temps, de manière à ne pas être obligé de les mettre en tas sous la pluie. De même, la mise en sac ou le chargement doivent se faire sur un emplacement couvert.

Même dans les climats froids ou très pluvieux, on peut composter de manière satisfaisante avec un minimum de bâtiments couverts. Par contre, les fortes chutes de neige gênent considérablement les opérations continues et il est généralement nécessaire d'enlever la neige. Pendant les froids vraiment rigoureux, le compost ne devient pas anaérobie et ne produit pas de mauvaises odeurs ; en conséquence, lorsque la surface disponible est suffisante, on peut laisser les tas sans les retourner pendant de longues périodes en attendant que le temps devienne plus clément.

Destruction des germes pathogènes

La destruction des germes pathogènes est un aspect très important du compostage des ordures contenant des excréta, des eaux d'égouts et autres matières fortement contaminées. C'est aussi un problème. Rares sont les études expérimentales de grande envergure qui ont été faites à ce sujet. Elles montrent cependant que le compostage en aérobose à des températures élevées détruit de manière efficace les germes pathogènes. Il semble que toutes les opérations de compostage bien organisées qui se pratiquent dans de nombreux pays aient pour caractéristique commune l'absence de danger pour la santé publique. Cette constatation fait bien ressortir l'intérêt du compostage aux températures élevées.

L'analyse des courbes de températures typiques données dans les figures 6, 7 et 8, et leur comparaison avec les indications du tableau 8 sur les températures mortelles pour un certain nombre de micro-organismes pathogènes, de parasites et d'œufs de parasites, montrent que la survie de certains agents pathogènes courants est peu probable. On voit que les températures bactéricides sont sensiblement inférieures aux températures maximums que l'on trouve à l'intérieur des tas de compost. Etant donné, d'une part, le niveau et la persistance de ces températures, et, d'autre part,

**TABLEAU 8. TEMPÉRATURES ET TEMPS D'EXPOSITION NÉCESSAIRES
A LA DESTRUCTION
DE CERTAINS AGENTS PATHOGÈNES ET PARASITES COURANTS**

Organisme	Remarques
<i>Salmonella typhosa</i>	Aucun développement au-dessus de 46°C; mort en 30 minutes à 55-60°C et en 20 minutes à 60°C: détruite rapidement dans le compost ⁴⁵
<i>Salmonella</i> sp.	Mort en une heure à 55°C et en 15 à 20 minutes à 60°C ⁴⁵
<i>Shigella</i> sp.	Mort en une heure à 55°C ⁴⁵
<i>Escherichia coli</i>	Pour la plupart, mort en une heure à 55°C et en 15 à 20 minutes à 60°C ⁴⁵
<i>Entamoeba histolytica</i> (kystes)	Mort en quelques minutes à 45°C et en quelques secondes à 55°C ⁵³
<i>Taenia saginata</i>	Mort en quelques minutes à 55°C ⁵³
<i>Trichinella spiralis</i> (larves)	Tuées rapidement à 55°C; instantanément à 60°C ⁵³
<i>Brucella abortus</i> ou <i>Br. suis</i>	Mort en 3 minutes à 62-63°C et en une heure à 55°C ⁵³
<i>Micrococcus pyogenes</i> var. <i>aureus</i>	Mort en 10 minutes à 50°C ⁶⁰
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Mort en 10 minutes à 54°C ⁶⁰
<i>Mycobacterium tuberculosis</i> var. <i>hominis</i>	Mort en 15 à 20 minutes à 66°C ou en quelques instants à 67°C ⁶⁰
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	Mort en 45 minutes à 55°C ⁶⁰
<i>Necator americanus</i>	Mort en 50 minutes à 45°C ⁸
<i>Ascaris lumbricoides</i> (œufs)	Morts en moins d'une heure aux températures dépassant 50°C ⁵³

les phénomènes d'antibiose qui caractérisent les flores mixtes de micro-organismes, on est fondé à penser qu'aucun germe pathogène, parasite ou œuf de parasite ne peut survivre au compostage en aérobiose.

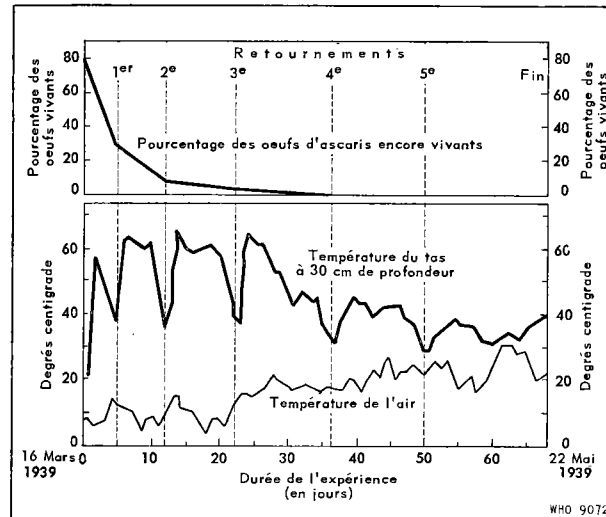
Comme nous l'avons décrit précédemment, la zone de températures élevées ne s'étend habituellement que jusqu'à 10 ou 20 cm de la surface. En conséquence, toute question d'aération mise à part, le retournement est nécessaire pour assurer la destruction des germes pathogènes et des parasites, surtout lorsque la période de compostage adoptée est de moins de six mois. On peut penser, en comparant les courbes de température du compost et les températures bactéricides, qu'il suffit de retourner une seule fois pour éliminer tous les agents pathogènes, à condition que toutes les matières qui se trouvent en surface soient bien ramenées vers l'intérieur du tas afin d'exposer tous les organismes présents aux températures mortelles. Il en est bien ainsi dans bon nombre de cas, mais à titre de précaution et pour être sûr qu'une partie de la couche superficielle n'aura pas échappé au retournement, il faut au moins deux manutentions, et même trois lorsqu'on mélange aux ordures des excréta et des boues d'égouts brutes et qu'on veut être entièrement assuré que la destruction est complète. Le même nombre de retournements est également la bonne règle à suivre pour l'aération lorsqu'on désire un compostage rapide en meules ou en tas disposés à même le sol.

Certains producteurs qui opèrent en fosses ne retournent qu'une seule fois ou même ne retournent pas du tout. Ils estiment que la période d'aérobiose qui suit la mise en tas initiale suffit à donner les températures élevées nécessaires pour tuer les germes pathogènes et les parasites. Il est permis de se demander sérieusement si cette manière de faire est suffisamment sûre lorsqu'on utilise pour le compostage des excréta ou des eaux d'égout : en effet, un certain nombre de germes pathogènes et de parasites risquent d'échapper à la destruction dans les couches extérieures moins chaudes. Scott⁶⁸ a constaté qu'il faut au moins deux retournements pour détruire *Ent. histolytica* en 12 jours et trois retournements pour détruire les œufs d'*A. lumbricoides* en 36 jours.

Les courbes de la figure 10, tirées d'une expérience de Scott, indiquent la température ambiante, la température à l'intérieur du tas, la date des retournements et le pourcentage des œufs viables d'ascaris. La meule étudiée contenait environ 1800 kg de matières fécales humaines fraîches, 500 kg de matières végétales et de paille sèches, 25 kg de cendres et 250 kg de terre. L'humidité du tas était de 60 %. La proportion des matières fécales était très élevée par rapport aux substances végétales et à la paille. De même, puisque les matières fécales ont une forte humidité, la quantité de terre et de cendres relativement inertes était assez élevée. Néanmoins, les œufs d'ascaris, qui semblent être les plus résistants de tous les agents pathogènes à envisager, ont été détruits complètement au bout de 36 jours. Il est possible qu'en retournant le compost à intervalles plus rapprochés,

on ait pu entretenir une température élevée plus constante et accélérer la destruction des œufs. Cette expérience montre toutefois qu'il est possible de détruire les parasites dans des conditions beaucoup plus difficiles que celles qui se présentent normalement quand on peut employer du fumier d'étable et une grande quantité de débris végétaux. Dans un tas comportant une forte proportion de matières organiques et retourné tous les deux ou trois jours pour entretenir une température à peu près constante d'environ 60°C, la destruction des germes pathogènes et des parasites devrait être complète en 6 à 8 jours, ou même moins.

FIG. 10. TEMPÉRATURE ET DESTRUCTION DES ŒUFS D'ASCARIS *



* D'après Scott,⁶⁸ avec l'aimable autorisation de Faber and Faber Ltd, Londres

Scott ⁶⁸ a constaté que, faute de retourner au début pour bénéficier des températures élevées du compostage en aérobiose, on laisse survivre des œufs d'*A. lumbricoides* pendant plusieurs mois. La fermentation anaérobie aux températures moyennes ne donne pas un taux satisfaisant de destruction des parasites, au moins si l'on opère pendant un temps relativement court. Certes, la mortalité naturelle des germes pathogènes et des parasites dans un milieu anaérobie, ainsi que les antagonismes biologiques finissent par les éliminer, mais il faut attendre en général six mois au moins. Ainsi donc, à moins qu'on ne puisse laisser ce délai s'écouler avant d'utiliser le compost, le traitement anaérobie doit être précédé d'une semaine au moins de décomposition aérobie à des températures élevées avec au moins un retournement, afin d'assurer la destruction des germes pathogènes.

D'une façon générale, il faut enlever soigneusement tous les débris qui traînent, veiller à la propreté générale des lieux et prêter une attention systématique à tous les détails de l'opération, surtout lorsqu'on composte des boues d'égout ou des excréta.

Lutte contre les mouches

L'un des problèmes les plus importants que pose le compostage est celui de la lutte contre les mouches. Les ordures ménagères, les matières fécales, le fumier animal, les déchets des abattoirs et les résidus du traitement des tomates ou autres aliments, constituent des milieux excellents pour la reproduction et le développement d'une importante quantité de mouches. Faute de mesures de protection, et surtout si l'on emploie du fumier et des matières fécales, le site en sera infesté. L'insalubrité de tels composts est presque aussi grave que celle des dépôts d'ordures non surveillés. Mais, moyennant un effort à peine plus grand que dans le compostage parfaitement salubre, les opérations entreprises pendant la saison des mouches peuvent être organisées de façon à combattre efficacement le pullulement. De toute façon, lorsqu'on utilise un digesteur fermé, il ne se pose aucun problème, sauf dans les trémies de chargement.

Les larves de mouches qui se trouvent dans les tas de compost proviennent d'œufs pondus soit pendant le ramassage des ordures soit pendant les manipulations subies sur les lieux de compostage. Si cette dernière provenance était la principale, il n'y aurait pas de problème. Mais, en fait, une grande partie des matières utilisées sont déjà infestées d'œufs et de larves à divers stades de développement, quelquefois même à la nymphose, lorsqu'elles arrivent à l'usine. Il est donc évident qu'elles doivent être préparées immédiatement pour le compostage et mises sans délai en tas ou en fosses, où les températures élevées et les conditions de milieu défavorables empêcheront l'éclosion des mouches de se poursuivre.

L'espèce dominante à combattre varie avec la région et avec la nature des matières utilisées. Dans les études de van Vuren⁶² en Afrique du Sud, c'était *Musca domestica*. Scott⁶⁸ a fait en Chine du Nord de larges enquêtes sur les préférences alimentaires des espèces rencontrées dans des conditions de milieu différentes. Il a constaté que *Musca vicina* était l'espèce dominante à l'intérieur des locaux et dans les villes, et *Chrysomya megacephala* en plein air et dans les campagnes, mais de nombreuses autres espèces étaient largement représentées. Il s'est d'ailleurs demandé si sa technique de classification permettait de distinguer dans tous les cas entre *M. domestica* et *M. vicina*. Golueke,²² étudiant en Californie le compostage de fumier animal, a rencontré principalement *M. domestica*. Les matières utilisables dans la fabrication du compost sont si variées qu'elles offrent de bonnes conditions de ponte pour un grand nombre d'espèces différentes, mais d'une manière

générale, on n'a pas à se soucier d'identifications précises, car les méthodes de lutte les plus sûres s'appliquent également à toutes les espèces.

Il est bon de rappeler que le cycle évolutif de la mouche domestique commune dure généralement de 7 à 14 jours lorsque les circonstances sont favorables. La durée des différents stades varie avec la température et avec certaines autres conditions, mais on peut tabler sur les moyennes suivantes : œufs, 1 à 2 jours ; larves, 3 à 5 jours ; pupes, 3 à 5 jours ; naissance de la jeune mouche, 7 à 11 jours ; nouvelle ponte, 10 à 14 jours. Il s'agit d'interrompre ce cycle et d'empêcher l'éclosion de la mouche adulte.

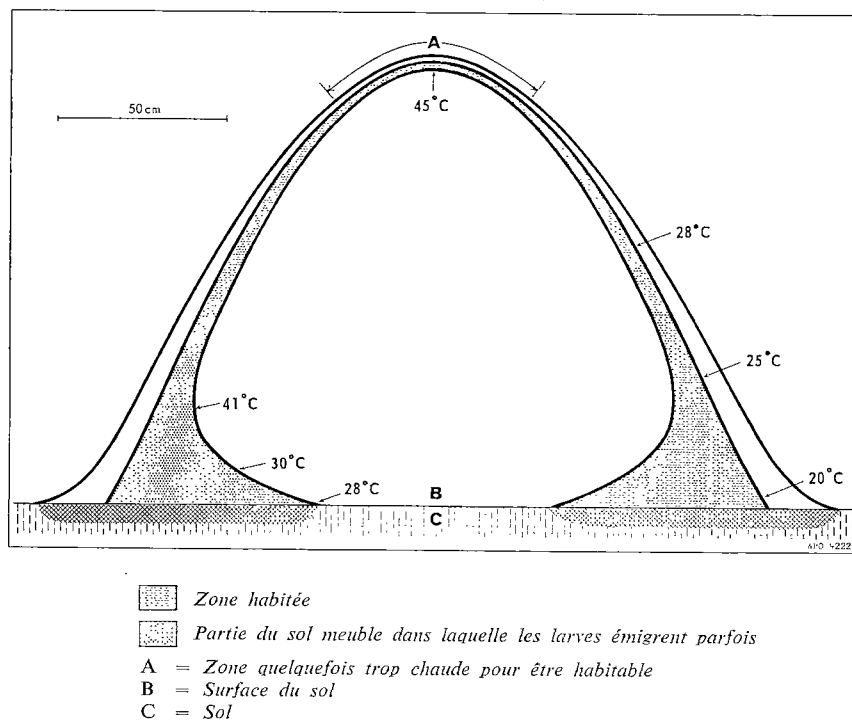
Certaines des techniques employées pour produire un compost de bonne qualité et pour détruire les parasites et les germes pathogènes (notamment le broyage, le retournement et la propreté systématique) sont en même temps des mesures efficaces de protection contre les mouches. La dilacération ou le broyage préliminaires servant à faciliter l'action des bactéries, détruisent également une bonne partie des larves et des pupes présentes dans les matières brutes. De plus, la consistance des ordures réduites en morceaux de 5 cm au maximum est moins favorable à la reproduction des mouches. Les études faites à l'Université de Californie sur le traitement d'ordures mélangées montrent qu'une fois les matériaux bruts broyés et mis en tas, même s'ils contiennent un nombre considérable de larves et d'œufs, aucune éclosion n'a lieu, les brassages étant pratiqués au rythme habituel d'un tous les deux ou trois jours. Des résultats semblables ont été obtenus au Danemark dans des installations où des ordures mélangées sont mises à composter après broyage, même sans retournements ultérieurs. Il semble que la reproduction des mouches dans les détritiques comprenant une proportion importante d'ordures ménagères soit efficacement arrêtée par la destruction mécanique des larves due au broyage, par le mélange et le changement de consistance des matières ainsi traitées, ainsi que par la chaleur rapidement dégagée dans les tas de compost. Toutefois, il n'en va pas de même lorsque la masse en compostage contient une proportion considérable de matières fécales, de fumier animal, de déchets d'abattoirs ou de rebuts rejetés par les conserveries de tomates ou d'autres produits analogues.

Lorsque des matières qui attirent des mouches et contiennent un grand nombre de larves et de pupes sont mises à composter, une partie des larves se déplacent vers les couches extérieures plus froides, et leur cycle évolutif se poursuit. La meilleure méthode pour les détruire est de retourner les tas fréquemment. On obtient de bons résultats en retournant quotidiennement lorsque l'infestation est forte et les conditions générales de reproduction favorables, et en retournant au moins tous les trois ou quatre jours quand ces conditions ne sont pas particulièrement propices.

Golueke²² a constaté, au cours d'études faites à l'Université de Californie sur le compostage de fumier de vache et de porc, que l'on diminue considérablement le nombre initial de larves et qu'on réduit le nombre des

mouches produites mais qu'on n'arrive pas à empêcher la reproduction de façon complète ou même simplement satisfaisante, si l'on ne retourne pas les tas tous les jours. En outre, la température initiale du compostage actif ne permet pas de combattre la reproduction des mouches, car une partie des larves et des pupes survivantes se déplacent vers les couches extérieures plus froides, et pénètrent même dans la terre lorsque les tas

FIG. 11. COUPE D'UN TAS DE FUMIER EN FORME DE MEULETTE DE FOIN, INDICANT LA ZONE HABITÉE PAR DES LARVES DE MOUCHES DOMESTIQUES LE SIXIÈME JOUR ²²



de compost sont disposés à même le sol. Scott,⁶⁸ van Vuren⁸² et Acharya¹ ont également observé dans les tas ou dans les fosses ce mouvement des larves et des pupes vers les couches extérieures.

La figure 11 donne une coupe transversale d'un tas de fumier en forme de meulette de foin, d'environ 2,50 m de diamètre et de 1,40 m de hauteur, et indique les zones habitées par les larves ainsi que les températures atteintes au sixième jour de compostage. Pendant toute la période, la température ambiante a varié entre 7 et 20°C environ. On voit que les larves ont envahi une zone considérable dans les couches superficielles de ce tas relativement petit et qu'une partie d'entre elles se sont réfugiées dans le sol à la lisière

du tas, où elles ont pu éclore par la suite. On a pu constater d'autre part que des mouches venaient pondre sur cette meule. Des tas plus grand (de 2,5 m à 3,5 m de diamètre) ou à base rectangulaire (2,6 m × 6 m) avec une hauteur d'environ 1,5 m, ont produit une chaleur suffisante pour que la zone habitable soit considérablement réduite et que la ponte diminue dans une certaine mesure. Le nombre des mouches qui éclosaient dans les petits tas restait faible tant qu'on les retournait fréquemment, mais dès qu'on restait trois jours sans le faire, les larves et les pupes se multipliaient fortement. A raison d'un retournement par jour ou tous les deux jours pendant les huit ou douze premières journées, on a pu réduire presque à zéro le nombre des larves et des pupes présentes dans les grandes meules et éviter le pullulement des mouches adultes. Si le compostage se fait sur un sol asphalté ou en béton, les larves ne peuvent plus se réfugier dans le sol et éclore lorsqu'on déplace les tas.

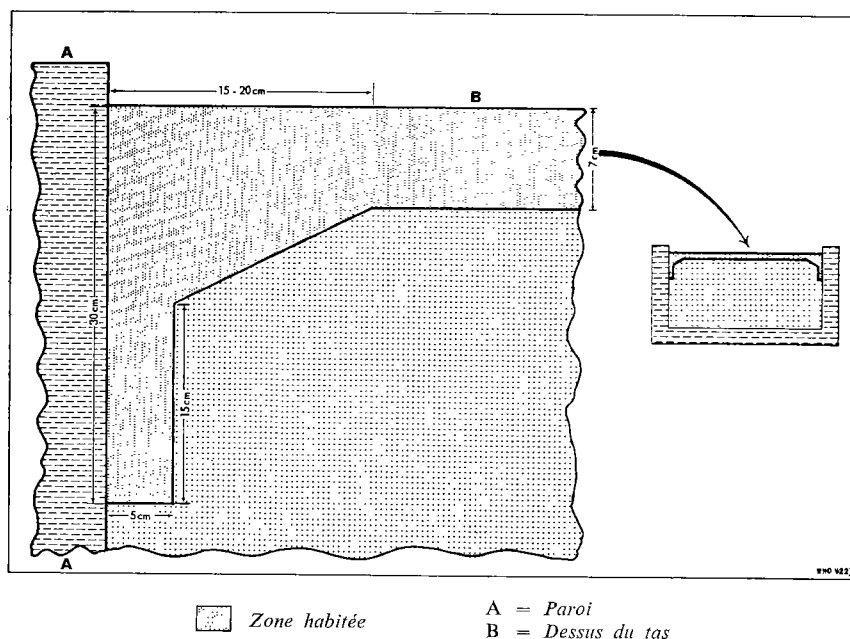
La Compost Corporation of America a constaté, au cours du traitement de matières attirant les mouches et infestées de larves et de pupes, que, si l'on isolait les tas avec du compost stabilisé, on produisait des températures élevées assez près de la surface pour éviter la reproduction des mouches.

Van Vuren,⁸² traitant dans des fosses revêtues de briques des ordures mélangées d'excreta, a étudié l'emplacement des larves de mouches en fonction de la température. Il n'a pas trouvé de larves dans les zones chauffées à plus de 50,5°C ; elles se déplaçaient vers les zones situées près des parois et au sommet du tas où la température était de 40,5 à 45,5°C, mais il s'en trouvait également dans des zones atteignant 46 à 50,5°C.

La figure 12 indique la zone habitée par des larves dans une fosse à compost où les températures intérieures les plus élevées atteignent 58 à 61°C. Cette expérience montre qu'il est possible de lutter contre les mouches en retournant le matériel. Il n'est pas difficile de déplacer à la fourche la couche infestée qui est très localisée et de la mélanger avec la masse plus chaude située au centre du tas. Au cours d'expériences de cette nature, van Vuren a constaté que 25 % des larves étaient détruites par le premier retournement (troisième jour) et que 85 % étaient détruites après le second retournement (huitième jour). Il est probable que le reste aurait été détruit par une troisième manipulation.

Il y a lieu de noter que van Vuren a constaté, en compostant des ordures urbaines et des excréments dans des fosses, qu'on pouvait empêcher la reproduction des mouches en retournant moins fréquemment que Golueke n'a dû le faire avec du fumier animal en tas. Cette différence tient sans doute au fait que les tas ont une surface exposée plus grande et que le fumier animal est un excellent milieu pour la reproduction des mouches. La plupart des détritiques et des matières végétales celluloses n'ont pas cette qualité. En recouvrant l'extérieur des tas ou des fosses où l'on fait composter des excreta, qui restent donc au centre de la masse, on facilite la lutte contre les mouches et il n'est plus nécessaire de retourner

FIG. 12. COUPE TRANSVERSALE D'UNE FOSSE A COMPOST, INDIQUANT LES ZONES HABITÉES PAR LES LARVES DE MOUCHES



aussi souvent. Cette couche extérieure, peu favorable à la ponte de nouveaux œufs constituera l'isolant thermique. Il faudrait autant que possible retarder au moins jusqu'au troisième jour le premier retournement afin que les excréta aient eu le temps de se stabiliser suffisamment. Plus cette stabilisation avance, moins les excréta et le fumier, qui prennent la forme d'humus, attireront les mouches.

On notera que la présence de larves dans les tas de compost, tout en constituant un signal d'alarme, n'indique pas nécessairement que des mouches adultes vont éclore. En effet, le compost peut contenir des œufs et des larves pendant les deux premières semaines sans poser de véritable problème, à condition qu'on le retourne assez souvent et avec assez de soin pour tuer les larves et les pupes avant la dernière mue. D'autre part, si le retournement semble être la meilleure méthode pour lutter contre les mouches, d'autres procédés peuvent être utilisés avec un succès acceptable lorsque le coût de la manutention ou certains autres facteurs en font apparaître les avantages économiques. Ainsi, van Vuren⁸² a fait des expériences pour déterminer les résultats obtenus en pulvérisant du naphthalène brut et des résidus de distillation sur les couches infestées de larves : il a constaté que, par rapport à une zone témoin non traitée, une seule pulvérisation diminuait le nombre des mouches de 66,2 % avec du naphthalène brut, et de 77,6 % avec un résidu de distillation. Il est possible qu'un second

traitement ait donné une destruction beaucoup plus complète. On peut encore utiliser d'autres insecticides. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que l'une ou l'autre de ces substances chimiques toxiques risque d'être nuisible aux organismes qui interviennent dans le processus du compostage ou de diminuer les qualités fertilisantes du compost. Etant donné que le compostage met en œuvre de grandes quantités de produits de faible valeur pendant une période relativement courte, il ne semble pas que l'utilisation d'insecticides relativement chers soit économiquement justifiée. Par contre, l'application d'insecticides pour lutter contre les mouches autour des bâtiments ou chantiers de compostage peut être utile.

Acharya¹ a mis au point diverses techniques pour détruire les mouches au cours du compostage en fosse sans manutention. Il a obtenu de bons résultats, alors qu'il traitait un mélange d'ordures urbaines et d'excréments, en disposant une couche d'ordures d'environ 25 cm au sommet du tas et en la recouvrant d'une couche de poussière d'environ 5 cm. Ces deux revêtements servaient d'isolant et permettaient d'entretenir les températures mortelles produites par la décomposition. Par temps de pluie, qui rend en général la lutte contre les mouches très difficile, on peut ajouter après le quatrième jour une couche de 10 cm formée de poussière contenant du fumier de vache et tassée de manière à former un enduit qui colle aux côtés de la fosse et isole la surface. A condition de boucher les fentes qui peuvent se former dans cet enduit, on arrive à détruire environ 95 % des larves et pupes, même pendant la saison pluvieuse. En revanche, ce procédé retarde la décomposition et exige une main-d'œuvre considérable ainsi que de grandes quantités de terre, qui ne sont pas toujours disponibles sur place. En dernière analyse, il risque d'être plus coûteux que le retournement des tas.

Dans l'Inde, on a essayé de détruire les mouches par le feu. A cette fin, on étend, vers le cinquième ou sixième jour, une couche de détritux secs de 15 cm environ par-dessus la couche de terre de 5 cm qui recouvre le compost et on y met le feu. On détruit ainsi environ 75 % des vers et des pupes, qui se rassemblent habituellement dans les couches supérieures.

En répétant ce traitement vers le dixième jour, on détruit près de 95 % des larves. Cette méthode a l'inconvénient de gaspiller des détritux utiles ; en outre, pendant les pluies, alors précisément que la reproduction des mouches risque d'être la plus rapide, il est difficile de trouver des matières sèches à brûler.

La méthode de la toile goudronnée a été également utilisée dans l'Inde pour empêcher l'éclosion des mouches adultes. On étend d'abord une couche de terre et de fumier de vache large d'environ 15 cm le long des bords de la fosse, puis on tend une toile, fortement goudronnée des deux côtés, sur la tranchée ou la fosse, et on la tend de telle sorte que ses bords reposent sur l'enduit de terre et de fumier. On étend alors sur tout le pourtour une deuxième couche d'enduit, de 15 cm de large et d'environ 8 cm

d'épaisseur, de manière à sceller la toile sur la fosse. On laisse la toile en place du cinquième au douzième jour, puis on l'enlève. Ces bâches goudronnées peuvent être utilisées à plusieurs reprises, et il en suffit de 6 ou 8 lorsqu'on remplit une nouvelle fosse par jour. Grâce à cette méthode, on arrive à détruire 95 % des larves présentes à l'origine dans les ordures et Acharya¹ la considère comme la plus économique pour le compostage en fosse.

Un autre procédé consiste à creuser des rigoles remplies d'eau sur tout le pourtour de la fosse. Les larves qui fuient la chaleur du compost viennent s'y noyer. Les rigoles doivent être nettoyées tous les jours. Cependant, l'efficacité de cette méthode n'est pas entièrement démontrée. Reprenant le principe du piège à mouches de Barbour, van Vuren⁸² a construit une fosse à compost dont le pourtour est muni d'un grillage métallique le long duquel court une rigole contenant du poison ; les larves, chassées par les hautes températures, émigrent vers les bords ainsi entourés et tombent dans la rigole. Cette dernière doit être nettoyée tous les jours pour éviter qu'elle ne soit bouchée par les déchets. Le piège permet de lutter efficacement contre les mouches, mais le temps nécessaire au compostage est augmenté du fait qu'il n'est plus possible d'aérer suffisamment. Il est permis de se demander si l'économie de main-d'œuvre réalisée sur les retournements n'est pas absorbée, et au-delà, par les frais supplémentaires que représentent le piège et son entretien.

Les méthodes indiquées ci-dessus, ainsi que d'autres qui permettent d'isoler complètement le tas ou la fosse sont les seuls moyens de lutter efficacement contre les mouches lorsque le compostage se fait en anaérobiose. Ainsi, les compartiments fermés comme ceux qui sont utilisés dans le procédé Beccari empêchent le développement et la sortie des mouches.

Le traitement à température élevée dans les digesteurs mécaniques ne pose aucun problème si le compost sortant de l'appareil est assez stabilisé pour ne plus attirer les mouches. Cependant, les matières dont le rapport C/N est peu élevé au départ peuvent être utilisées comme engrais après un temps de décomposition assez court ; elles risquent donc d'attirer encore les mouches quand on les retire des digesteurs et de constituer ainsi un foyer de reproduction. Pour éviter cet inconvénient, il faut prolonger le traitement pour qu'un humus sans attrait pour les mouches ait le temps de se former, ou encore faire sécher le compost.

Les fumiers de cheval ou de vache présentent le problème le plus difficile car ils sont plus favorables que tout autre milieu à la ponte des œufs et au développement des larves. Viennent ensuite, dans l'ordre de difficulté, les mélanges de matières fécales et d'ordures ; mais on peut remédier dans une certaine mesure à la situation en recouvrant les excreta d'une couche d'au moins 30 cm de déchets qui n'attirent pas les mouches et en s'efforçant d'obtenir un maximum de stabilisation et de destruction des germes pathogènes et des parasites avant qu'il devienne nécessaire de retour-

ner le matériel pour la première fois. Le compostage d'un mélange d'ordures et de déchets broyés n'appelle généralement aucune précaution spéciale contre les mouches.

Pour mesurer l'intensité de la reproduction et l'efficacité de la méthode de lutte choisie, il faut disposer des pièges à mouches en différents points stratégiques autour de la zone de compostage.

Wilson ⁹¹ a obtenu de bons résultats en recouvrant ses tas de compost avec une couche d'herbes de 30 cm d'épaisseur, ne contenant aucune nourriture pour les larves. Il a constaté qu'on pouvait également se protéger en plaçant le compost sur du ciment ou sur toute autre surface dure qui empêche les larves de se métamorphoser.

Les poules et autres oiseaux de basse-cour contribuent à la lutte contre les mouches en mangeant les larves lorsqu'elles émigrent vers l'extérieur du tas ou de la fosse pour échapper aux températures élevées. Cependant, en grattant les tas et en éparpillant le compost, les poules risquent de créer de nouveaux gîtes larvaires et de provoquer des inconvénients plus graves.

Tout autant que dans les tas de compost, il faut empêcher la reproduction des mouches dans les allées, dans les fosses ou sur les surfaces momentanément inutilisées. A cette fin, le nettoyage, le ramassage et le rejet sur les tas de tout ce qui peut servir de gîte ou répandre de mauvaises odeurs, et la propreté générale sont des règles essentielles.

Les ouvrages de Scott ⁶⁸ et de van Vuren ⁶² donnent des indications plus détaillées sur la lutte contre les mouches lors du compostage. De même, de nombreux ouvrages ou publications entomologiques fournissent des renseignements complets sur la reproduction des insectes dans les fumiers.

Dans l'ensemble, la méthode la plus efficace est de retourner le compost ; si elle est appliquée correctement, elle donne d'excellents résultats. Lorsqu'on traite des ordures mélangées ou du fumier animal, surtout en grandes quantités, le plus économique est de former des tas ou des silos sur une dalle de béton ou sur un sol dur, en retournant à la fourche ou même mécaniquement, ce qui est généralement moins cher. Lorsqu'on composte des matières fécales ou des gadoues, les fosses ou compartiments présentent l'avantage d'enfermer le matériel infesté et d'éviter de l'étaler sur une grande surface en le retournant, comme c'est le cas avec les rangées. Le compost en fosses peut être retourné mécaniquement si les considérations économiques le permettent.

Récupération de l'azote et d'autres éléments nutritifs

Les deux buts les plus importants du compostage des déchets organiques sont : *a)* récupérer ou conserver les éléments nutritifs et fertilisants de ces déchets, et *b)* assurer la salubrité de leur traitement et de leur utilisation afin d'empêcher la propagation de maladies. Parmi les principales

substances nutritives — azote, phosphore et potasse —, la première nommée est la plus importante à récupérer dans la plupart des pays du monde, car c'est très souvent sa rareté qui limite la production alimentaire. D'autre part, l'azote est plus difficilement retenu que le phosphore, la potasse et les oligo-éléments qui, du fait de la forme chimique sous laquelle ils se présentent, ne se perdent que par lessivage. L'azote peut aussi se perdre de cette façon, mais la principale cause de déperdition est le dégagement dans l'atmosphère d'ammoniac ou d'autres composés azotés volatils provenant des matières compostables.

De nombreuses recherches ont été faites et des volumes ont été écrits sur la conservation de l'azote et des autres éléments nutritifs, plus particulièrement dans ses rapports avec la microbiologie du sol. Nous limiterons l'examen de cette question à la conservation et à la récupération au cours du processus de compostage, sujet sur lequel les données expérimentales sont relativement limitées. Les résultats des recherches et des études sur l'utilisation de l'azote dans les processus biologiques fondamentaux donnent les renseignements de base dont on a besoin pour limiter les pertes d'azote au cours du compostage.

Le dégagement d'ammoniac au cours du compostage aérobie varie avec le rapport C/N, le pH, l'humidité, l'aération, la température, la forme initiale des composés azotés et la capacité d'adsorption ou de retenue de l'azote que possèdent les matières utilisées.

Etant donné que les micro-organismes utilisent environ 30 parties de carbone pour une partie d'azote,⁸³ un rapport C/N initial voisin de 30 — dont on a déjà vu qu'il est le plus favorable au compostage — semble aussi celui qui permet la meilleure fixation de l'azote dans la substance cellulaire et qui limite donc le mieux les pertes. Divers chercheurs donnent des chiffres variant de 26 à 38 comme valeur optimum du rapport C/N.^{3, 30, 47, 56, 67, 70} Un rapport C/N (quantités effectivement disponibles) de 30 ou davantage permet de réduire les pertes au minimum, mais il faut souligner que le rapport carbone/azote mesuré par analyse chimique ne correspond souvent pas au rapport des quantités effectivement disponibles. En pratique, comme la plupart des matières utilisées contiennent des quantités considérables de cellulose et de lignines qui résistent à la décomposition biologique et comme la plus grande partie de l'azote est généralement présente sous une forme immédiatement disponible, il se peut qu'un rapport C/N (quantités totales) considérablement supérieur à 30 soit nécessaire pour assurer une conservation optimum de l'azote. Scott,⁶⁸ qui a étudié le compostage de mélanges différents (ordures rurales et matières fécales d'une part, paille et matières fécales d'autre part) a constaté que la valeur optimum du rapport C/N se situe entre 38 et 40. D'après ses résultats, les pertes d'azote augmentent rapidement dès que le rapport initial tombe en dessous de ces chiffres. Ses études montrent également que la conservation de l'azote diminue rapidement lorsque le rapport passe de 40 à 50.

Cette baisse rapide est d'ailleurs difficile à concilier avec les lois fondamentales de la décomposition bactérienne. Au-dessus de 50, la conservation de l'azote se maintient uniformément à 70 % de l'optimum. Théoriquement, les pertes devraient à peine dépasser le minimum lorsque le rapport C/N initial est supérieur à celui qu'utilisent les micro-organismes. En effet, lorsqu'il y a excès de carbone, les micro-organismes doivent avoir besoin de tout l'azote disponible pour décomposer les matériaux carbonés. En Nouvelle-Zélande,⁵⁶ des chercheurs ont constaté qu'un rapport C/N d'environ 26 donnait le compostage le plus rapide. Cependant, avec des rapports initiaux de 22 à 29, leurs pertes d'azote étaient d'environ 50 %. Scott⁶⁸ signale des pertes allant jusqu'à 60 % au cours de certaines de ses expériences, mais avec des rapports C/N faibles. Des pertes d'environ 50 % ont été observées au cours des études faites à l'Université de Californie⁸¹ avec des rapports C/N compris entre 20 et 25 ; au-dessus de 30 cependant, les pertes étaient minimales. Le tableau 9 emprunte à ces études

TABEAU 9. CONSERVATION DE L'AZOTE EN FONCTION DU RAPPORT C/N

Epreuve	Rapport C/N initial	Pourcentage d'azote final (à sec)	Conservation de l'azote (%)
1	20	1,44	61,2
2	20,5	1,04	51,9
3	22	1,63	85,2
4	30	1,21	99,5
5	35	1,32	99,5
6	76	0,86	108

quelques pourcentages de conservation de l'azote pour différentes valeurs du rapport C/N. Waksman⁸⁶ a constaté que, dans les composts à base de fumier, l'azote ne se conservait bien que si le rapport C/N était suffisamment élevé et si la décomposition commençait immédiatement, provoquant la transformation des formes solubles de l'azote en formes non solubles. Si la décomposition était retardée, la température étant trop basse ou trop élevée, il existait une déperdition de composés azotés volatils. Il est possible de conserver 85 à 90 % et même 95 %, de l'azote présent dans les matériaux bruts, lorsque le rapport C/N est élevé et que les autres causes de pertes sont combattues.

Du point de vue de la teneur initiale et finale en azote envisagée dans ses rapports avec la teneur en carbone, on peut envisager trois cas : a) lorsque la quantité de carbone est faible par rapport à celle de l'azote, c'est-à-dire lorsque les micro-organismes trouvent plus d'azote qu'ils n'en ont besoin pour utiliser le carbone (rapport C/N bas), des quantités très considérables d'ammoniac et de composés azotés volatils se dégagent et se perdent ; b) lorsque le carbone et l'azote sont présents en proportions

convenables pour l'utilisation par les bactéries, la décomposition se fait sans perte appréciable d'azote ; c) lorsque la quantité d'azote est faible par rapport à celle du carbone, un certain nombre de micro-organismes meurent et l'azote qu'ils contiennent est réintroduit dans le cycle comme on l'a déjà vu à propos du compostage en aérobiose. En outre, lorsque les conditions sont favorables, de petites quantités supplémentaires d'azote peuvent être acquises par fixation. Ainsi donc, dans ces trois cas, la quantité finale d'azote tend à être la même, c'est-à-dire celle que peuvent contenir les bactéries lorsque le compost est stabilisé. Dans le premier cas, il y a perte ; dans le second, il y a conservation avec stabilisation ; dans le troisième il y a réintroduction dans le cycle, avec concentration et parfois gain. On voit donc que les opérations de compostage peuvent être conçues de manière à conserver la majeure partie de l'azote présent dans les déchets.

L'ammoniac s'échappe de plus en plus facilement sous forme d'hydroxyde d'ammonium à mesure que le pH s'élève au-dessus de 7. Or, au cours des dernières étapes du compostage, le pH peut atteindre 8 ou 9. A ce moment, il ne doit pas y avoir trop d'azote présent sous forme d'ammoniac. Les matières contenant une grande quantité de cendres auront un pH initial élevé et il faut s'attendre à une perte d'azote plus grande. En pareil cas, il faudrait autant que possible séparer une partie des cendres et les rajouter après le compostage ; on réduirait ainsi les pertes d'azote pendant la période de décomposition active, au cours de laquelle une certaine quantité d'ammoniac libre peut être présente aux stades intermédiaires de la décomposition.

Certains producteurs de compost ont proposé d'ajouter de la chaux pour améliorer l'opération. Cette addition ne doit se faire que dans des circonstances exceptionnelles, par exemple lorsque les matières brutes ont une acidité élevée due à des déchets industriels ou lorsqu'elles contiennent des éléments dont la décomposition libère de grandes quantités d'acide. Mais, lorsque le pH se maintient au-dessus de 4-4,5 et que les déchets utilisés ne sont pas fortement tamponnés à ce niveau, il est recommandé de ne pas ajouter de chaux. Le pH augmentera sous l'effet de l'action biologique et l'azote sera conservé.

L'humidité du compost a une influence sur la conservation de l'azote, mais beaucoup moindre que le rapport C/N et le pH. Le dégagement d'ammoniac est plus grand lorsque l'humidité est faible. En effet, l'eau sert de solvant et de diluant pour l'ammoniac, réduisant ainsi la tension de vapeur et la volatilisation. Une humidité variant entre 50 et 70 %, satisfaisante également à d'autres égards, facilite la conservation de l'azote.

L'aération et le retournement ont un effet défavorable. En effet, l'ammoniac qui a pu se former s'échappe plus facilement lorsque le compost est remué et exposé à l'air libre. Cependant, si le rapport C/N initial est suffisamment élevé, les pertes d'azote pendant les manutentions seront minimales. Néanmoins, puisqu'une certaine quantité d'ammoniac peut être

présente pendant les phases dynamiques intermédiaires de la décomposition active, on prendra soin de ne pas retourner les tas plus souvent qu'il n'est nécessaire pour entretenir l'aérobiose et pour détruire les mouches. Dans l'ensemble, lorsque les autres facteurs sont favorables, les pertes dues aux manutentions ne seront pas importantes. Il semble pourtant que certains producteurs aient été amenés à préférer le compostage en anaérobiose pour la conservation de l'azote parce que le retournement provoquait des pertes quand les autres facteurs étaient défavorables.

Les températures élevées augmentent la volatilisation et l'échappement d'ammoniac. Comme elles sont inséparables de la décomposition aérobie et qu'elles sont nécessaires pour la destruction des germes pathogènes, on ne peut faire mieux que de les empêcher de monter au-dessus de 70°C, niveau où l'activité bactérienne est ralentie et l'accumulation d'ammoniac facilitée. En laissant la température diminuer dès que la désinfection a été obtenue, on peut aussi réduire légèrement la perte d'ammoniac. Toutefois, comme celle-ci se produit en majeure partie pendant les premières phases de la décomposition active, on ne s'assure qu'un avantage minime en réduisant la température après les deux premiers retournements ou après les 6 à 8 premiers jours de décomposition active. Si les autres facteurs de rétention de l'azote sont satisfaisants et que la température se maintient en-dessous de 65-70°C, l'effet du retournement sur la perte d'azote sera faible.

La forme sous laquelle l'azote est initialement présent peut aussi jouer un rôle. Si les matières brutes contiennent de grandes quantités d'ammoniac, une partie risque de se volatiliser et de se perdre avant que les micro-organismes aient eu le temps de l'utiliser et de le stabiliser, même si le rapport C/N est satisfaisant de ce point de vue. Ce facteur peut être important, puisqu'une grande partie des pertes d'azote se produisent au cours des premiers jours du compostage.

Certaines substances, telles que la cellulose et les matières fibreuses et poreuses adsorbent ou retiennent l'humidité et les substances volatiles, réduisant ainsi leur tendance à s'échapper. De nombreux faits indiquent que ces substances contribuent à diminuer les pertes d'azote dans les composts qui contiennent de l'ammoniac accumulé. Scott ⁶⁸ a constaté qu'aux basses valeurs du rapport C/N, les matières compostables riches en fumier de cheval ou de vache semblent mieux retenir l'azote que d'autres et il les considère comme des fournisseurs d'azote. Ce phénomène, qu'il a observé au cours de ses expériences, s'explique sans doute par la forme de l'azote, la capacité d'adsorption ou de rétention de l'azote ou encore par d'autres caractéristiques du fumier. Scott a noté en outre que, si l'on ajoute de la terre aux composts riches en ammoniac, une partie de l'azote est adsorbée.

Il peut y avoir des pertes d'azote par lessivage pendant les pluies ou lorsque les matières traitées ont une humidité initiale trop élevée et que

le liquide en excès s'écoule. L'intensité du phénomène dépend de la quantité d'azote soluble présent dans le compost et du volume des précipitations. Il est possible de réduire le lessivage en disposant les tas de compost de manière à empêcher l'eau de pluie d'y pénétrer.

Nous ne disposons d'aucun renseignement sur les pertes d'azote qui se produisent dans les digesteurs aérés mécaniquement. Toutefois, elles paraissent devoir être très élevées s'il y a production d'ammoniac libre, car le brassage et l'aération continuels tendent à laisser échapper le gaz au fur et à mesure qu'il se forme et avant qu'il puisse être fixé dans les cellules bactériennes.

Plusieurs chercheurs font état d'un enrichissement des composts par fixation de l'azote atmosphérique. Howard & Wad³⁵ signalent des gains de 4,4 à 26,3 %. Van Vuren⁸² et Scott⁶⁸ ont observé tous deux le même phénomène dans des mélanges d'ordures urbaines, de matières fécales et de fumier animal lorsque les conditions étaient favorables. Comme il fallait s'y attendre, on a trouvé des organismes fixateurs d'azote dans des composts, d'ailleurs stabilisés depuis plusieurs mois. Il semble douteux que cet enrichissement se produise lorsqu'on opère à haute température sur des périodes ne dépassant pas 12 à 30 jours. Waksman⁸⁶ a constaté, en compostant des fumiers, que la fixation d'azote se faisait plus rapidement à des températures variant entre 28°C et 50°C et qu'elle avait lieu après la période de décomposition rapide, généralement 33 jours ou davantage après le début du traitement.

Les conditions nécessaires à la fixation d'azote sont les suivantes : absence ou production très minime d'ammoniac, présence d'hydrates de carbone solubles dans l'eau, présence d'organismes fixant l'azote et niveaux convenables de température, de pH et d'humidité. Après la décomposition qui accompagne le compostage, il reste peu d'hydrates de carbone solubles dans l'eau, mais la dégradation lente et régulière de la cellulose pourrait en produire une quantité suffisante pour fixer l'azote. Cet enrichissement est souhaitable, mais on ne doit pas compter l'obtenir dans la plupart des opérations de compostage. Avec les méthodes les plus récentes, la seule fixation d'azote qui ait lieu se produit probablement dans les vieux composts et pendant le stockage du produit fini, avant qu'il ne soit devenu trop sec.

Pour enrichir les composts produits à partir de déchets pauvres en azote, tels que le coton, les tiges de sorgho, les bagasses de cannes à sucre et autres résidus à forte teneur en cellulose, Jackson et al.⁴³ proposent de planter sur les tas de produit fini du chanvre du Bengale (*Crotalaria juncea*) ou autres plantes qui fixent l'azote. Quand ces plantes ont jeté un réseau serré de racines porteuses de nodules, on retourne les tas, où elles se décomposent en donnant un compost final plus riche en azote.

Différentes études^{32, 68, 82} ont montré que les pertes d'azote sont très faibles pendant le stockage, à moins que le compost ne contienne de grandes

quantités d'ammoniac. Scott⁶⁸ et d'autres estiment que le compostage anaérobie conserve sans doute mieux l'azote que l'aérobie. Cependant, le sort de l'azote dans les tas anaérobies est trop mal connu pour qu'on puisse déterminer l'étendue de la dénitrification et mesurer le dégagement d'azote et d'ammoniac. Le compostage anaérobie réunit plusieurs conditions très favorables à la dénitrification : a) présence de quantités relativement élevées d'ammoniac ; b) abondance de matières organiques décomposables ; c) absence d'oxygène libre ; d) pH convenable ; e) humidité propice. La conception classique suivant laquelle la dénitrification n'a lieu que dans des conditions d'anaérobiose a été récemment remise en question, car il y a maintenant de bonnes raisons de penser que le phénomène se produit également dans des conditions d'aérobiose. On est en tout cas fondé à se demander si, lorsque les autres facteurs sont favorables à la conservation, le compostage anaérobie autre qu'en fosses ou en cuves fermées permet une meilleure rétention de l'azote que le compostage aérobie.

La récupération optimum serait évidemment assurée par le procédé de la digestion anaérobie dans l'eau, qui conserve à la fois les matières solides et les liquides. En effet, si d'une part on ne peut obtenir ainsi une fixation d'azote, les pertes seraient en revanche presque nulles puisque l'ammoniac à faible concentration dans le liquide ne s'échapperait pas.

Un exposé sur la conservation de l'azote ne serait pas complet s'il ne faisait pas ressortir que les plus grandes pertes d'azote comme de potasse et, dans une large mesure, de phosphore, sont dues à l'absence de récupération des urines dans les fermes et dans les installations hygiéniques des villes et des villages. Comme on l'a montré plus haut, l'urine animale est beaucoup plus riche que les matières fécales en substances organiques, en azote et en potasse, et contient presque autant de phosphore. Dans les fermes, une grande partie des éléments nutritifs contenus dans le purin s'infiltré dans le sol jusqu'au niveau des eaux souterraines ou se perd par ruissellement en surface. Dans de nombreuses agglomérations urbaines ou rurales où l'on pratique le ramassage des gadoues, les urines et les matières fécales sont séparées et seules les secondes sont ramassées parce que l'évacuation des premières ne constitue pas un problème de santé publique important. Une grande partie de l'urine est évacuée avec les eaux de lessive quand elle n'est pas déversée dans une fosse creusée dans un coin de la cour de ferme, d'où elle s'infiltré dans le sol.

Acharya¹ et Scott⁶⁸ ont étudié des méthodes permettant de récupérer une plus grande quantité d'urine humaine en utilisant des récipients spéciaux contenant une matière absorbante qui assure la séparation. Dans les fermes, on peut creuser des fosses que l'on remplit de couches alternées de déchets, de balayures, de paille et d'autres débris cellullosiques ainsi que de terre. Ces fosses peuvent être aménagées en des points où elles recevront le purin en même temps qu'elles serviront d'urinoirs aux habitants. Il faudrait en construire au moins deux. Dès que le contenu arrive à

saturation, il doit être enlevé, étendu sur le sol comme humus, et remplacé.

La conservation du phosphore et de la potasse au cours du compostage ne présente aucune difficulté car, en pratique, la seule cause de déperdition est le lessivage par la pluie.

Temps nécessaire au compostage

La période de 1 à 6 mois que prévoient certains producteurs de compost pour la décomposition des déchets n'est en général pas le minimum de temps nécessaire à une stabilisation convenable, qui peut être obtenue sensiblement plus vite. D'ordinaire, les producteurs choisissent une période qui convient à leur méthode particulière de compostage et à leur programme d'utilisation du produit fini. Dans la pratique, les temps de compostage les plus longs comprennent à la fois la stabilisation active et un délai réservé à ce que l'on appelle couramment la « maturation ». Du point de vue du rapport C/N et des qualités du produit en tant qu'humus, le compost est en général dans un état satisfaisant pour l'épandage aussitôt que la période de stabilisation active est terminée et qu'on ne peut plus entretenir de températures élevées dans la masse même si l'aérobiose persiste. Une certaine stabilisation ultérieure, notamment la décomposition de la cellulose et des lignines, se produit alors lentement, mais le rapport C/N varie peu au cours de cette période de maturation.

Le temps nécessaire à une stabilisation convenable dépend avant tout des facteurs suivants : a) rapport C/N initial ; b) dimensions des particules ; c) entretien de l'aérobiose ; d) humidité. En admettant que l'humidité soit optimum, que le compost reste aérobic et que les dimensions des particules en facilitent l'attaque par les micro-organismes présents — tous facteurs qu'on peut contrôler au cours de l'opération — c'est le rapport C/N qui détermine la durée de la stabilisation. C'est quand il est bas que la décomposition est la plus rapide, car la quantité de carbone à oxyder pour atteindre la stabilisation est faible. De plus, dans les matières compostables qui présentent cette caractéristique, une proportion plus importante du carbone est en général présente sous une forme immédiatement utilisable, tandis que les matières dont le rapport C/N est plus élevé contiennent davantage de cellulose et de lignine, assez résistantes. Ainsi que nous l'avons montré précédemment, la cellulose et la lignine sont attaquées en dernier par une population microbienne modifiée dans un milieu modifié. Lorsque le rapport C/N (quantités effectivement disponibles) dépasse 30, le processus doit être plus long pour permettre la réintroduction de l'azote dans le cycle.

Les études faites à l'Université de Californie⁸¹ sur le compostage en tas aérobies d'ordures urbaines mélangées et broyées (ordures ménagères et autres déchets), avec une humidité de moins de 70 %, donnent la relation

suivante entre le rapport C/N et le temps nécessaire à la stabilisation active :

<i>Rapport C/N initial</i>	<i>Nombre approximatif des jours nécessaires au compostage</i>
20	9-12
30-60	10-16
78	21

Des études faites sur le compostage de fumiers animaux et de litières de paille ou de luzerne ont donné des périodes de stabilisation semblables lorsque le rapport C/N est inférieur à 50.

Si l'aérobiose n'est pas entretenue pour que les températures restent élevées pendant la période de décomposition active, si les particules sont de dimensions trop grandes pour que les bactéries les attaquent facilement ou si des morceaux trop gros deviennent le siège de conditions d'anaérobiose à l'intérieur de leur masse, la période de compostage est plus longue.

Dans des conditions d'aérobiose et à des températures élevées, avec un rapport C/N inférieur ou égal à l'optimum, la masse prend l'apparence et l'odeur d'humus au bout de 2 à 5 jours de décomposition active. Cependant, celle-ci n'est pas encore terminée à ce moment, et il se peut que le rapport C/N n'ait pas encore été réduit au niveau souhaitable pour un engrais.

Earp-Thomas, la Dano Corporation, Snell et d'autres, estiment que 2 à 3 jours suffisent dans des silos-digesteurs aérés mécaniquement. Il est certain qu'au bout de ce délai, on aura obtenu un produit voisin de l'humus si on opère sur des ordures ménagères qui contiennent peu de déchets résistants, dont le rapport C/N est d'environ 20 et qui sont souvent déjà en voie de décomposition lorsqu'on les reçoit. Cependant, si on lui en laisse la possibilité, cet humus continue généralement à se décomposer à des températures élevées pendant un temps considérablement plus long. D'autre part, s'il était suffisamment déshydraté pour empêcher l'action biologique, il pourrait être manipulé sans inconvénients et employé comme engrais. On sait en effet que, dans le procédé de traitement des eaux d'égouts qui utilise des boues activées, des matières présentant un rapport C/N très bas sont stabilisées en quelques heures jusqu'à un point où, après dessiccation, elles constituent un excellent engrais. En revanche, lorsque l'humidité dépasse 40 %, la décomposition active se poursuit le plus souvent. Il paraît en tout cas douteux qu'un compost ayant un rapport C/N élevé, ou même seulement supérieur à 25, puisse être stabilisé convenablement au bout de 3 ou 4 jours s'il contient de la cellulose et de la lignine. La Dano Corporation emmagasine le produit sortant de son digesteur aéré *Bio-stabilizer* pendant 7 à 10 jours, au cours desquels il subit une nouvelle stabilisation sans qu'il soit cependant nécessaire de l'aérer ou de le retourner.

Acharya,¹ Scott,⁶⁸ van Vuren,⁸² Scharff,⁶⁶ Weststrate⁸⁹ et un grand nombre d'autres chercheurs prévoient des périodes de compostage plus longues qui comprennent généralement un temps de maturation. La durée plus prolongée de la stabilisation active est souvent due à un nombre moins élevé d'aérations et de retournements. Le tableau 10 indique les temps de compostage appliqués dans des conditions différentes dans plusieurs parties du monde.

Le temps effectif de compostage n'est pas d'une importance particulière, à condition qu'il suffise à la destruction des germes pathogènes et des parasites et à la conservation de l'azote. Certes, il contribue à déterminer la surface nécessaire aux opérations mais, dans la plupart des cas, la différence entre un cycle de 10 jours et un cycle de 30 jours est sans conséquence. En effet, la demande de compost destiné à servir d'engrais est saisonnière tandis que l'approvisionnement en matières premières est plus ou moins uniforme. Il est donc habituellement nécessaire d'entreposer de grandes quantités de compost stabilisé entre les périodes de grande demande de l'agriculture, qui sont déterminées par les saisons des semailles et des récoltes. Le matériel peut être entreposé en tas ou en fosses de petites dimensions puis accumulé en grandes meules lorsqu'il est stabilisé, ou encore broyé et mis en sacs pour être conservé sous toit. Le temps de conservation en fosses ou en tas dépend avant tout des nécessités économiques de l'exploitation.

Lorsqu'on utilise un terrain coûteux et qu'un capital important a été investi en installations de toutes sortes, notamment dans les grandes exploitations municipales, il peut être souhaitable de ne laisser le compost sur l'aire de décomposition active (fosses, meules ou silos) que pendant le temps strictement nécessaire à la stabilisation, et de l'entreposer ensuite en grandes meules où il attendra le moment de la préparation finale pour la vente. Lorsque les travaux se font à la main, par exemple dans les fermes et dans les villages, il peut être plus économique de retourner moins souvent et de prolonger l'opération, puis de laisser les paysans prendre directement livraison du compost dans les fosses ou sur les tas. Il n'est pas rationnel d'employer des méthodes onéreuses d'aération pour accélérer le compostage si le produit doit être ensuite conservé en sacs dans un dépôt coûteux jusqu'au moment où le consommateur est prêt à venir l'enlever. Si le compost n'est pas suffisamment sec, les sacs pourrissent. La méthode la moins coûteuse consiste donc à entreposer jusqu'à la vente dans de grandes meules disposées en plein air.

Les aspects techniques et économiques seront examinés plus loin en détail, mais il y a lieu de souligner ici que, sous réserve du maintien d'une qualité convenable, la fréquence des retournements, le temps de compostage, l'emmagasinage et les autres conditions d'exploitation doivent être fixés en fonction de l'économie des moyens et du souci de conserver l'azote.

TABLEAU 10. TEMPS DE COMPOSTAGE DANS DIVERSES CIRCONSTANCES

Méthode	Matières premières	Producteur	Temps	Echelle de production
Digesteur aéré	Ordures ménagères triées plus boues d'égout	Frazer, New York	7 jours	Exploitation
Digesteur aéré	Ordures ménagères	Michigan State College	3 à 5 jours	Usine-pilote
Digesteur aéré	Déchets mélangés	Dano Corporation	3 à 5 jours	Usine-pilote
Tas retournés	Ordures ménagères et paille	Université de Californie	5 à 9 jours	Expérimentale
Tas retournés	Déchets urbains mélangés contenant des ordures ménagères	Université de Californie	10 à 21 jours	Exploitation
Tas retournés	Déchets urbains mélangés contenant des ordures ménagères et des boues d'égout	Université de Californie	10 à 16 jours	Exploitation
Tas retournés	Fumier de vache ou de porc plus paille	Université de Californie	10 à 16 jours	Exploitation
Fosses (avec retournement)	Déchets séchés à l'air et excreta	Ficksburg, Union Sud-Africaine	30 jours en fosse ; 4 à 6 semaines de maturation	Exploitation
Fosses (avec retournement)	Déchets séchés à l'air et excreta	Calcutta, Inde	20 jours	Exploitation
Tas retournés peu souvent	Déchets urbains mélangés	Dannevirke, Nouvelle-Zélande	20 à 30 semaines	Exploitation
Fosses aérées	Déchets triés plus boues d'égout	Comté de Dumfries, Ecosse	6 semaines de compostage ; 6 semaines de maturation	Exploitation
Tas retournés	Déchets urbains mélangés	Compost Corporation of America	20 à 30 jours	Exploitation
Tas retournés	Déchets urbains ne contenant pas d'ordures ménagères	VAM, à Schiedam, Pays-Bas	3 à 6 semaines	Exploitation
Tas non retournés	Déchets urbains ne contenant pas d'ordures ménagères	VAM, à Wijster, Pays-Bas	4 à 6 mois	Exploitation
Fosses (sans retournement)	Déchets sans ordures ménagères, excreta, cendres, etc.	Inde	4 à 6 mois	Exploitation
Tas	Déchets, végétation et excréments	Malaisie Kenya	2 mois 2 mois	Exploitation
Fosses (avec retournement)	Déchets sans ordures ménagères, excreta, fumiers, paille et terre	Chine du Nord	2 à 8 mois	Usine-pilote et exploitation

Appréciation de l'état du compost

Nombreuses sont les épreuves et les vérifications qui permettent de suivre les phases du processus et d'apprécier l'état du compost. Du point de vue du fonctionnement d'ensemble et du produit final, il y a trois groupes d'épreuves : *a*) évaluation de la qualité sanitaire des opérations et du produit (destruction des germes pathogènes et des parasites, absence de mouches et d'odeurs) ; *b*) évaluation de la valeur fertilisante ou de l'intérêt agricole (quantité d'azote, de phosphore, de potasse et d'autres éléments nutritifs, conservation de ces éléments, rapport C/N et utilité du compost indiquée par le rendement des récoltes ; *c*) évaluation de l'intérêt économique (vérifier si le coût total de production est inférieur à la valeur de l'engrais obtenu augmentée du coût de l'évacuation des ordures par d'autres méthodes telles que l'incinération ou l'utilisation comme matériau de remblayage).

Le producteur qui composte le fumier de sa ferme, les détritrus de son jardin ou même les ordures de son petit village, ne s'embarrasse généralement pas d'épreuves détaillées et se contente de vérifier si son produit n'est pas insalubre, ce que lui indiquera la température, et s'il fait un bon engrais, ce qui se voit à l'apparence. Au contraire, une grande exploitation municipale a besoin d'épreuves pour contrôler la qualité sanitaire et agricole du compost, et aussi sans doute pour surveiller la marche de ses opérations.

La recherche des agents pathogènes importants pour la santé publique peut être confiée le cas échéant à des organismes ou laboratoires spécialisés. Des épreuves chimiques peuvent être pratiquées suivant des méthodes standards pour doser l'azote sous ses différentes formes, le phosphore et la potasse, et pour vérifier la nature organique des matières traitées ; elles servent utilement à analyser le produit fini et à déterminer les effets de différentes techniques de compostage. Pour les opérations quotidiennes, la température, l'aspect du compost, les odeurs et la présence de mouches sont les signes importants. La propreté des lieux, l'absence générale de mouches, ainsi que l'absence d'une grande quantité de larves dans les tas, sont des critères de la qualité sanitaire de la technique adoptée. La température est le meilleur indice de l'avancement du compostage aérobie et elle permet également de déterminer si les germes pathogènes, les parasites et les graines de mauvaises herbes sont détruits.

La température du compost peut être vérifiée de différentes manières : *a*) en creusant dans la meule pour tâter le compost ; *b*) au toucher d'une tige plongée dans la masse ; ou encore *c*) en utilisant un thermomètre. Le premier moyen donne une idée approximative de la température. Le compost doit donner une sensation de forte chaleur qui ne permet pas d'y laisser la main pendant longtemps. En outre, lorsqu'on ouvre le tas, il

doit se dégager de la vapeur. Une tige en métal ou en bois, enfoncée à 50 cm de profondeur pendant 5 à 10 minutes pour le métal et 10 à 15 minutes pour le bois, doit ressortir trop chaude pour qu'on puisse la tenir. Ces contrôles sont suffisants pour le compostage individuel ou à l'échelle du petit village. Dans les exploitations plus importantes, on doit utiliser des thermomètres métalliques à longue tige pour mesurer la température en différents points de la masse. Ce type d'appareil long d'environ 50 cm et muni d'un cadran à son extrémité, est le plus pratique car il ne se casse pas facilement.

Lorsque le processus de compostage en aérobiose se déroule normalement, la température monte rapidement jusqu'à 55-70°C au cours des trois premiers jours. Dans les tas ou les fosses de petites dimensions, on observe souvent un palier vers 43 et 50°C, qui marque le passage d'une flore mésophile à une flore thermophile. Cet arrêt ne se produit en général pas dans les grandes masses utilisées par les usines importantes car elles ont un pouvoir isolant plus élevé et les organismes thermophiles deviennent rapidement dominants. Après la première montée, une température élevée persiste pendant plusieurs jours au cours de la période de décomposition active, à condition que les conditions de l'aérobiose se maintiennent. Ensuite, une lente baisse de température se manifeste au fur et à mesure que la chaleur produite diminue par rapport à la chaleur radiante. Au cours de cette période, l'activité bactérienne diminue plus rapidement que ne l'indique la température ; ce décalage est dû aux qualités isolantes des matières compostées.

Lorsqu'un tas de compost n'atteint pas une température élevée au cours des 3 à 6 premiers jours, on peut en conclure, soit qu'il est trop petit pour retenir la chaleur, soit que l'humidité est excessive ou insuffisante, soit encore que les matières organiques et les éléments nutritifs sont présents en quantités insuffisantes pour donner lieu à une décomposition rapide.

Cependant, l'état de la masse ne peut être jugé d'après la seule température. Une baisse de cet indice signifie peut-être que le milieu est devenu défavorable aux bactéries aérobies thermophiles, soit à cause d'une chaleur excessive, soit par manque d'oxygène, soit encore à cause d'une humidité insuffisante. Dans certains cas exceptionnels, que l'on ne rencontre guère au cours du compostage des ordures urbaines, la présence d'une substance acide fait baisser le pH à tel point que la température diminue. En conséquence, pour juger des progrès du compostage, il faut compléter les indications tirées de la température par l'application d'autres critères simples.

Si le refroidissement est dû à la destruction des bactéries par une chaleur excessive, on aura noté, avant la baisse, des températures sensiblement au-dessus de 70°C. L'installation de l'anaérobiose se reconnaît facilement aux odeurs désagréables que l'on remarque plus particulièrement lorsque le tas est remué. On sait alors qu'une aération est nécessaire pour entre-

tenir une décomposition active et des températures élevées. De plus, la fermentation anaérobie donne à l'intérieur du tas une couleur vert pâle, légèrement lumineuse, que l'on reconnaît facilement et qui change très peu d'un jour à l'autre, alors que le compost aérobie normal se caractérise par une couleur qui fonce progressivement.

De même, le producteur de compost expérimenté constate sans difficulté l'excès ou le manque d'humidité ; il apprend très rapidement à discerner à vue si le compost est trop humide ou s'il faut le mouiller. Pratiquement, un compost sec a tout simplement l'air d'être sec et un compost trop humide présente des suintements de liquide et son aspect est mouillé ou même détrempé. On peut utiliser une tige de fer pour évaluer l'humidité à différentes profondeurs. Plongée dans la masse, cette tige doit être tout à fait mouillée aux endroits où elle a été en contact avec le compost.

On peut admettre qu'un compost est prêt lorsqu'il est possible de l'entreposer indéfiniment en grandes meules sans qu'il devienne anaérobie ou qu'il produise une chaleur appréciable ; on peut alors l'épandre dans les champs sans danger du fait que son rapport C/N est bas ou qu'il contient peu de carbone utilisable. Toutefois, une activité très ralentie continue à se manifester, et le compost « mûrit » encore un peu dans les meules.

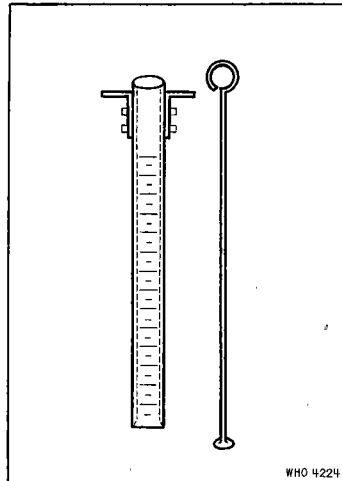
Dans une grande exploitation, le moment précis où le compost est prêt doit être déterminé d'après l'aspect et par des tests de laboratoire. Un critère pratique et commode est fourni par une température déclinante qu'on ne peut attribuer ni à la destruction des bactéries par la chaleur, ni au manque d'oxygène ni à une humidité insuffisante et qui intervient après une évolution typique caractérisée par une montée rapide suivie d'un palier. Lorsque la température est ainsi redescendue à 55 ou 50°C, on peut admettre que le compost est prêt. Une certaine maturation lente avec décomposition de cellulose peut encore se poursuivre, mais après que la masse a été aérée par sa mise en meule définitive, elle ne doit plus s'échauffer. Elle doit alors être d'une couleur gris-noir ou brun-noir, suivant qu'elle contenait ou non à l'origine des tanins et autres substances à pigmentation brune. Néanmoins, la couleur n'est pas à elle seule un critère suffisant car un bon compost commence à prendre l'apparence d'un riche terreau bien avant que la chute de température n'indique la diminution de l'activité microbienne.

Des indications complémentaires sont fournies par l'évolution caractéristique des odeurs. Le broyage suffit à remplacer l'odeur aigre et graisseuse des ordures brutes par celle de la matière végétale verte fraîchement coupée. De plus, l'aération que provoque le broyage contribue à éliminer les relents d'hydrogène sulfuré dans les fumiers et autres matières analogues. Au cours de l'augmentation initiale de température des tas de compost, on sent souvent des odeurs de cuisson, mais elles diminuent progressivement à mesure que la décomposition avance. Une légère odeur d'ammoniaque se dégage parfois et peut même devenir très prononcée si le compost perd

très rapidement son azote. On peut en conclure que la méthode employée n'assure pas une bonne conservation de l'azote. Comme on l'a déjà vu, une odeur putride indique que la décomposition devient anaérobie et que la masse doit être aérée. Les tas de compost anaérobie peuvent produire les odeurs les plus nauséabondes. En fin de traitement, le compost doit être inodore, tout au plus sentir légèrement la terre ou le moisi.

Ces épreuves physiques grossières sont suffisantes pour la plupart des petites installations individuelles ou de village, dont le produit est

FIG. 13. SONDE A COMPOST



pris sur place par les paysans de l'endroit qui s'en servent sur des terres plus ou moins voisines. Dans les grandes usines qui écoulent sur un large marché un compost destiné à différents usages, il faut en outre des analyses de laboratoire pour déterminer la qualité du produit fini et contrôler la production.

Comme nous l'avons déjà mentionné, la mesure de l'humidité n'a pas besoin d'être faite avec une précision de laboratoire lorsqu'il s'agit de suivre la marche de l'opération ; par contre, une détermination plus rigoureuse est nécessaire si le produit fini doit être mis en sacs et vendu au poids. La figure 13 représente une sonde utilisée dans l'Inde pour prélever des échantillons dans différentes parties du tas. On peut en fabriquer une avec un

tube d'acier de 4 cm de diamètre intérieur et de 1 m de longueur. Une extrémité est aiguisée pour présenter un bord tranchant et des poignées peuvent être soudées ou rivées à l'autre bout pour faciliter l'enfoncement. La sonde est accompagnée d'une tige qui permet d'extraire l'échantillon contenu dans le tube. Il est préférable de faire des prélèvements séparés à des profondeurs de 30, 60 et 90 cm, plutôt que d'enfoncer la sonde en une seule fois jusqu'au fond, ce qui comprimerait trop l'échantillon et empêcherait de distinguer entre les éléments correspondant aux différentes profondeurs.

Un prélèvement de volume approprié est déposé dans une bassine dont le poids a été déterminé préalablement ; la bassine et son contenu sont alors pesés, mis au four à environ 103°C pendant deux heures et pesés à nouveau. Le pourcentage d'humidité est calculé d'après la formule suivante après déduction du poids de la bassine :

$$100 \times \frac{\text{poids initial} - \text{poids final}}{\text{poids initial}} .$$

Le poids total des matières minérales, que l'on appelle généralement cendres, est déterminé en incinérant un poids connu de l'échantillon sec, pour en éliminer toutes les matières organiques combustibles. On pèse à nouveau après refroidissement. Le pourcentage des cendres, à sec, est le suivant :

$$100 \times \frac{(\text{poids à sec avant incinération} - \text{poids après incinération})}{\text{poids à sec avant incinération}}.$$

Les techniques de laboratoire servant à déterminer l'azote, le phosphore et la potasse sont plus précises et exigent un équipement plus complet, mais il n'y a là que des analyses chimiques relativement simples. La détermination du rapport C/N, très importante du point de vue de la conservation de l'azote et de l'appréciation du compost fini, présente un problème plus difficile, car l'analyse quantitative du carbone est difficile, longue et coûteuse. D'après une étude faite en Nouvelle-Zélande,⁵⁶ il suffirait pour les besoins du compostage de calculer le pourcentage du carbone présent d'après le pourcentage des cendres, beaucoup plus simple à mesurer. La formule serait la suivante :

$$C = \frac{100 - \text{pourcentage de cendres}}{1,8}.$$

Les chercheurs de l'Université de Californie⁸¹ ont contrôlé cette méthode simple : l'approximation par rapport aux résultats des déterminations plus précises est de 2 à 10 %.

Si le compost doit être modifié par addition de sulfate d'ammonium, de phosphates ou d'autres éléments nutritifs pour servir d'engrais spécial, il est nécessaire de déterminer à sec la concentration de ces substances afin de permettre à l'acheteur de comparer avec d'autres engrais.

Qualité des composts

La valeur nutritive des composts varie considérablement suivant la qualité des matières premières utilisées. Si elles contiennent du sang, des déchets d'abattoirs, de l'urine conservée, des ordures ménagères et du fumier ou des boues d'égouts, le produit final sera plus riche en azote et autres éléments nutritifs que si l'on opère principalement sur de la paille, des balayures, des bagasses, des cendres, de la terre ou des ordures urbaines. La liste ci-après indique les valeurs entre lesquelles varient les caractéristiques chimiques de la plupart des composts finis, produit sec. Les écarts sont assez considérables car les matières premières étant très diverses, les composts ont des qualités chimiques très différentes.

<i>Substances</i>	<i>Pourcentage (poids)</i>
Matière organique	25-50
Carbone	8-50
Azote (N)	0,4-3,5
Phosphore (P_2O_5)	0,3-3,5
Potassium (K_2O)	0,5-1,8
Cendres	20-65
Calcium (CaO)	1,5-7

McGauhey & Gotaas⁴⁹ ont déterminé les caractéristiques de composts, préparés à partir d'ordures et de rebuts urbains contenant des quantités considérables de papier et ils ont trouvé les valeurs moyennes suivantes (produit sec) : N, environ 1,4 % ; P_2O_5 , environ 1,1 % ; K_2O , environ 0,8 % ; carbone, environ 28 % ; cendres, environ 37 %. Golueke²² a analysé cinq qualités différentes de compost fait avec du fumier de bétail et de porc contenant des quantités considérables de paille et de luzerne ; il a obtenu les valeurs suivantes (produit sec) : N, 0,8-2,2 % ; P_2O_5 , 2,2-4,7 % ; K_2O , 1,5-5,2 % ; C, 14-31 % ; cendres, 20-56 %. L'étude néo-zélandaise portant sur les composts produits dans 12 localités différentes donne les valeurs suivantes (produit sec) : N, 0,6-2,7 % ; P_2O_5 , 0,05-0,8 % ; K_2O , 0,5-1,5 % ; C, 15-56 % ; cendres, 5,1-63 %. Dans ces expériences, la teneur en azote des divers composts était en moyenne d'environ 1,7 %.

Les matières premières utilisées aux Pays-Bas par la VAM sont les détritiques des balayures et des cendres ne contenant pratiquement pas d'ordures ménagères, de fumier ou de substances riches en azote. L'analyse du compost fini sec donne, en moyenne, les chiffres suivants : matières organiques, 4,5-12 % ; N, 0,4-0,5 % ; P_2O_5 , 0,4-0,5 % ; K_2O , 0,4 % ; cendres, 75-80 %. La qualité de ce compost est moins bonne que d'ordinaire parce que les matières premières se composent principalement de cellulose et de détritiques analogues.

Il y a lieu de penser que les composts contiennent également une grande variété d'oligo-éléments. On n'a guère fait d'analyses précises, mais du fait que les déchets, les ordures ménagères et les excréta contiennent des produits de l'agriculture, on doit logiquement retrouver ces oligo-éléments dans le compost. Des expériences agricoles indiquent que les engrais à base de compost ont des effets favorables que leur teneur en azote, en phosphore, en potasse et en humus ne suffit pas à expliquer.

Aspects économiques du compostage

Tous les agriculteurs connaissent les avantages économiques généraux que présente l'épandage de fumiers et de déchets organiques. Ils savent que la récupération de ces produits conditionne non seulement les rendements immédiats mais encore l'entretien de la fertilité du sol et les récoltes à

venir. Dans les régions où les conditions économiques ne permettent pas d'utiliser des engrais minéraux pour compléter les déchets organiques, la récupération efficace de l'azote contenu dans ces déchets peut être un facteur important du niveau de vie et de l'économie alimentaire. Composter les résidus organiques de manière à pouvoir les utiliser sans crainte comme engrais est de bonne économie pour toutes les fermes et pour la plupart des villages dans différentes parties du monde. En effet, lorsque ces résidus sont à proximité des terrains qui doivent les recevoir, aucun problème économique ne se présente.

Au contraire, le compostage des déchets des grandes agglomérations urbaines fait intervenir une série de considérations économiques, car le producteur et propriétaire des déchets ne se confond pas avec l'utilisateur. Bien qu'elle soit responsable de leur enlèvement dans des conditions de salubrité satisfaisante, la municipalité propriétaire des déchets ne s'intéresse généralement pas directement à leur utilisation agricole. Son principal souci est d'évacuer ces résidus de façon aussi simple et aussi peu coûteuse que le permettent les exigences de l'hygiène. De plus, la plupart des villes éprouvent des hésitations compréhensibles à faire un investissement important qui, pour être rentable, les oblige à devenir entrepreneurs en même temps que gardiennes de l'hygiène publique.

Lorsqu'une ville adopte le compostage comme méthode d'élimination des ordures, elle doit comprendre que la vente du compost n'a pas à payer entièrement les frais de l'opération. En effet, d'autres méthodes d'enlèvement des ordures, telles que l'utilisation pour le remblayage ou l'incinération (qui coûte généralement quatre à six fois plus que le remblayage), comportent des dépenses très considérables sans aucune contrepartie financière. D'un point de vue strictement financier, il suffit que le produit de la vente du compost soit au moins égal à la dépense totale ainsi encourue, y compris les frais généraux et les intérêts, diminuée du coût de l'enlèvement des ordures par toute autre méthode qui pourrait être appliquée. Le poids du compost fini varie généralement entre 50 et 80 % du poids initial des matières brutes, après l'enlèvement des déchets non compostables et récupérables. La réduction de poids sec est donc de 20 à 50 %, suivant la composition initiale et la perte d'humidité.

Les agriculteurs des régions où la culture intensive est nécessaire pour couvrir les besoins alimentaires connaissent la valeur du compost en tant qu'engrais et sont prêts à l'acheter à un prix qui correspond à son intérêt économique. Dans certaines zones où l'on n'utilise que des engrais minéraux, il peut être utile de prendre des mesures éducatives pour montrer les possibilités que présente l'utilisation d'engrais organiques, complétés par des engrais minéraux, de manière à réduire le prix de revient tout en entretenant la fertilité du sol. Quand on traite de grandes quantités de matériaux de faible valeur unitaire tels que les déchets organiques, il est indispensable de réduire au minimum le coût de production.

Il semble que le compostage des ordures urbaines et des boues d'égouts offre des possibilités intéressantes pour les investissements privés, plus à même que les autorités municipales de résoudre les problèmes de vente et de commercialisation. Le concessionnaire privé ne pourrait compter que sur la ville pour lui fournir la matière première ; il doit donc être assuré d'un approvisionnement régulier avant de placer des capitaux dans une installation de compostage. Il lui faut un contrat ou la garantie que la ville ne va pas décider d'adopter une autre méthode d'évacuation avant l'expiration d'une période raisonnable qui lui permette d'amortir son capital.

Les villes pourraient aussi payer à un entrepreneur une somme égale au coût de l'exploitation d'un système municipal d'évacuation des ordures et l'autoriser à faire un bénéfice sur la vente du compost, à condition qu'il accepte les risques que comporte l'opération et qu'il s'engage à produire dans de bonnes conditions d'hygiène.

Un contrat à long terme avec la ville, éventuellement avec partage des bénéfices dépassant un pourcentage déterminé, serait peut-être un bon moyen d'intéresser le capital privé à l'utilisation de déchets, ce qui déchargerait la ville du soin de récupérer et de vendre le compost. Dans bien des cas, il serait possible que la ville et un entrepreneur privé financent ensemble une installation qui serait exploitée par l'entrepreneur en régime mixte avec partage des bénéfices. Il y a de nombreuses régions où la demande locale serait telle que la vente ne présenterait aucune difficulté pour la municipalité. Dans certaines villes, le compost est produit en régie directe et vendu par adjudication annuelle à des entrepreneurs qui se chargent de la revente.

La création d'entreprises coopératives pour le compostage et la récupération des excréta et des ordures offre de nombreuses possibilités, surtout dans les villages et les petites villes. Cette exploitation coopérative pourrait être très avantageuse dans les villages où chaque ferme ne produit pas assez de matières premières pour permettre une fabrication individuelle satisfaisante. Les agriculteurs et jardiniers pourraient aussi constituer des coopératives qui passeraient des contrats avec les autorités municipales pour l'élimination des déchets de la ville par voie de compostage. Les membres de la coopérative pourraient non seulement trouver ainsi une source d'humus fertilisant mais, de plus, participer aux bénéfices éventuels de l'opération. Toutefois, des formules de ce genre ne seraient sans doute guère intéressantes lorsqu'il s'agirait de composter les déchets d'une grande ville où les quantités risquent d'être trop grandes pour être absorbées par les fermes de la région immédiatement voisine. Dans ces conditions, la coopérative serait obligée d'organiser un service de vente et de distribution, dépassant ainsi l'objectif essentiel de cette organisation, qui est de fournir à la région en question des engrais à bon marché.

Lorsque le compost produit par une grande ville ne peut être consommé entièrement par les fermes des alentours immédiats, les frais de transport

risquent de grever le prix de vente. Certes, l'humus servant d'engrais pour les jardins d'agrément, l'horticulture et les exploitations maraîchères, peut être transporté à des distances considérables sans grand inconvénient économique. Par contre, l'utilisation massive de compost dans les fermes n'est économiquement possible que si le produit est bon marché et si des frais de transport élevés ne le mettent pas hors de portée des agriculteurs éloignés.

Le producteur et distributeur de compost ne doit jamais perdre de vue que ses méthodes doivent avoir un rendement suffisant pour permettre de vendre à des prix que l'agriculteur peut payer. C'est ce qui se fait avec succès aux Pays-Bas, dans l'Inde et dans de nombreux autres pays.

L'addition de boues d'égouts aux matières compostables présente des avantages économiques. Les boues peuvent être soit préalablement digérées en anaérobiose, puis mélangées avec les ordures pour le compostage, soit utilisées à l'état brut s'il n'y a pas intérêt à récupérer les gaz produits par la digestion. En les traitant de cette manière, on s'assure une garantie d'hygiène supplémentaire. Les manutentions représentent une partie importante du coût du compostage de ces mélanges. Or, les diverses techniques possibles se présentent sous un jour économique très variable d'une région du monde à l'autre. On peut cependant affirmer d'une manière générale, que, pour les grandes installations, le coût de manutention par tonne peut être réduit considérablement par la mécanisation. Toutefois, l'économie ainsi réalisée dépend de multiples facteurs locaux. L'analyse et la planification des grandes exploitations municipales de compostage sont donc affaire d'ingénieurs et exigent une connaissance complète du processus ainsi que des conditions économiques locales.

Parmi les principaux facteurs économiques à considérer dans l'organisation d'une usine de compostage, on peut citer : les installations de réception, de triage, de récupération et, éventuellement, de broyage ; le matériel et les immobilisations ; le terrain nécessaire, la main-d'œuvre, l'énergie et tous autres frais d'exploitation et d'entretien ; l'intérêt du capital et les amortissements ; enfin la valeur marchande du produit fini.

Le triage et la récupération des chiffons et de certains métaux ferreux et non ferreux sont généralement intéressants, mais il en va souvent autrement des bouteilles, des boîtes de conserve et du papier, à moins qu'il ne s'agisse d'une région où ces matériaux sont demandés. Cependant, dans les grandes installations de compostage où le triage et la récupération font partie de la suite normale des opérations, il est possible de récupérer avec bénéfice un certain nombre de matériaux qui ne pourraient l'être autrement. C'est le cas du papier, souvent présent en quantités considérables.

Le prix de revient du compost varie considérablement suivant les conditions de production et sous l'effet des facteurs indiqués ci-dessus. Les expériences faites dans l'Inde ont fourni de nombreux renseignements sur les éléments du coût total, et notamment sur les frais de main-d'œuvre

dans les villes agricoles. Il n'en est pas de même dans le cas des grandes villes, où l'on peut mécaniser les opérations pour réduire le prix de revient. Au Danemark, en Angleterre, en Allemagne, aux Pays-Bas, en Nouvelle-Zélande, en Suède et dans l'Union Sud-Africaine, où des machines sont assez largement employées avec de bons résultats, l'expérience acquise a permis de réunir un certain nombre de données comptables mais il faut noter que ces renseignements ne sont pas directement comparables d'une grande exploitation à l'autre. Chacune demande une analyse distincte des circonstances particulières qui déterminent le coût de production ainsi que des possibilités de vente du compost.

Le Natural Resources (Technical) Committee²⁷ de Grande-Bretagne a conclu que le compostage des ordures urbaines ne serait en général pas rentable en Angleterre. Cette commission estime que la quantité de matières organiques récupérables dans les ordures urbaines serait faible par rapport aux besoins du sol et à l'apport que peuvent fournir les pratiques agricoles courantes. Elle ajoute : « Néanmoins, on peut envisager, lorsque les circonstances s'y prêtent, la création de petites installations gérées en collaboration par les autorités locales et par les agriculteurs pour produire des composts à partir de boues d'égouts et de déchets agricoles. Ce rapport ne fournit toutefois aucune comparaison entre le coût du compostage en Angleterre et d'autres méthodes d'enlèvement des déchets organiques. Gothard & Brunt,²⁵ qui ont fait une étude détaillée des procédés de compostage et qui ont évalué le coût de production à l'échelle municipale en Angleterre, critiquent les principes mêmes de l'analyse ainsi présentée ; ils fournissent des données comptables et des renseignements de base qui contredisent les conclusions de la commission. Ces conclusions contradictoires montrent à nouveau combien il est important d'obtenir des renseignements plus complets en faisant des expériences pour déterminer la valeur précise des engrais organiques à base de composts pour les divers usages agricoles.

Un ingénieur conseil, M. J. Fruchtbaum, a fait une étude complète des plans et des frais d'exploitation d'une installation commerciale de compostage, la Compost Corporation of America, à Oakland (Californie). L'analyse du coût de production, faite dans l'hypothèse d'une manutention assurée par des méthodes efficaces, indique que si les déchets mélangés s'obtenaient moyennant une redevance symbolique pour l'évacuation, un bénéfice très intéressant pourrait être réalisé par la vente du compost et des matériaux récupérés en traitant 300 tonnes de matières brutes par jour. Les devis établis par la Compost Corporation montrent que les déchets livrés à l'usine pourraient être compostés et transformés en engrais à un prix sensiblement plus bas que celui de l'incinération. Ainsi, en admettant que les agriculteurs prennent eux-mêmes le compost à l'usine et se chargent de l'emmagasiner, la ville pourrait le leur donner gratuitement et faire encore une économie sur ce que lui coûterait l'incinération des ordures. Ces mêmes

analyses montrent en outre qu'un compost d'une qualité et d'un prix semblables à ceux du fumier de ferme pourrait être produit avec bénéfice.

Seabrook,⁶⁹ ingénieur municipal de Tacoma (Etat de Washington) a fait des recherches dans une installation-pilote sur le compostage de déchets mélangés et de boues d'égouts. D'après les résultats de ces études, il estime que, sans même tenir compte du coût actuel de l'envoi aux décharges, la ville pourrait réaliser un bénéfice en compostant les déchets et les boues d'égouts. Son rapport indique en outre que des plans sont à l'étude pour la construction d'une usine assez puissante pour composter tous les déchets organiques de la ville.

La Dano Corporation (communication personnelle, 1955) estime que, dans une usine installée à Los Angeles et recevant 50 tonnes d'ordures brutes par jour, le coût de production par le procédé *Bio-stabilizer*, compte tenu de l'amortissement du matériel, serait à peu près égal au prix de l'incinération. Ainsi, en admettant que le compost ait une valeur marchande, la dépense nette serait moindre qu'avec le système de l'incinération.

La méthode de compostage en silos est probablement beaucoup plus économique que l'emploi de petits digesteurs aérés mécaniquement lorsqu'il s'agit de traiter des quantités importantes de l'ordre de 200 tonnes par jour ou plus. Cependant, les petits digesteurs pourraient présenter un intérêt comparable s'ils étaient installés en plusieurs points du territoire municipal, permettant ainsi de réduire les frais de transport des matières brutes. Ces petits appareils, fermés et aérés mécaniquement, comportent moins de risques de nuisance et pourraient être montés dans des zones où il ne serait pas recommandable d'établir une grande exploitation en plein air.

L'utilisation économique du compost dépend avant tout de l'existence de débouchés dans une zone accessible sans frais de transport excessifs. Lorsque le compostage des ordures additionnées de boues d'égouts coûte moins cher que leur enlèvement par d'autres moyens, le prix de vente peut être fixé à un niveau avantageux pour l'agriculture.

L'existence de nombreuses installations de compostage à grand débit montre que le traitement des ordures urbaines pour la fabrication et la vente d'engrais peut être rentable ; il est néanmoins nécessaire de procéder à une analyse approfondie du marché et du coût de production avant de construire une usine. Etant donné que les ordures constituent une matière première volumineuse et de faible valeur, il est essentiel que la méthode de fabrication choisie soit d'un prix de revient aussi faible que possible.

Il semble que la récupération des ordures urbaines à des fins agricoles fournisse l'occasion de resserrer la collaboration entre la ville et la campagne dans l'amélioration générale de l'économie régionale. Il n'est pas possible de chiffrer la valeur de cette collaboration, mais il a été démontré souvent et dans différentes régions du monde, que les progrès accomplis dans un secteur de la collectivité peuvent se répercuter sur un autre et être avantageux

pour tous. La récupération économique des ordures urbaines suppose un procédé de traitement bon marché qui permette de vendre le produit fini en grandes quantités à un prix suffisamment bas pour que son utilisation devienne intéressante pour l'agriculture.

De nombreuses installations de compostage ont trouvé un marché intéressant parmi les maraîchers et les pépiniéristes qui pratiquent la culture intensive et peuvent acheter des engrais organiques à des prix élevés. Si ce marché est intéressant du point de vue des bénéfices sur la vente, il serait cependant vite saturé par une production massive utilisant de grandes quantités d'ordures urbaines. Pour être économique, la récupération des déchets des villes doit fournir un engrais à un prix suffisamment bas pour que toutes les catégories d'agriculteurs puissent l'utiliser.
