

APPROCHE DES RISQUES CHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES DANS LE SECTEUR DU COMPOSTAGE

Cet article dresse l'inventaire non exhaustif des risques chimiques et biologiques encourus par les salariés sur les plates-formes de compostage. Les résultats montrent la présence de trois polluants majoritaires : les matières particulaires totales (MPT), l'ammoniac et les endotoxines. Bien qu'elles soient en moyenne inférieures à la valeur limite de moyenne d'exposition (VME), les concentrations en MPT sont significatives et peuvent atteindre des valeurs localement très élevées en fonction du travail et de la configuration des lieux. Les concentrations en ammoniac semblent plus préoccupantes (28 % sont supérieures à la VME) sur certaines plates-formes closes traitant les boues de stations d'épuration urbaines. L'étude a également mis en évidence que les caissons filtrants sur chargeuses étaient inefficaces dans la moitié des cas. Les endotoxines sont présentes sur tous les sites parfois à des concentrations très élevées. Les concentrations en micro-organismes cultivables sont aussi très variables et peuvent atteindre des valeurs très importantes, notamment pour les bactéries thermophiles, dont la majorité des mesures sont supérieures à 10^5 UFC/m³ sur certaines plates-formes.

Le compostage est un procédé de traitement biologique des déchets organiques fermentescibles (ordures ménagères, déchets verts, bio-déchets ménagers, boues de station d'épuration, etc.). Il permet la valorisation agronomique des composts comme le préconisent les législations française et européenne. Les pouvoirs publics encouragent le développement du compostage qui est, avec la méthanisation (encore peu développée en France), un mode de gestion écologique des bio-déchets correspondant aux

objectifs du « Grenelle de l'environnement ». L'autre raison de l'expansion de cette activité est sa compétitivité par rapport aux autres modes de valorisation ou d'élimination des déchets, même si ces dernières années la croissance du nombre d'installations tend à ralentir. La quantité de déchets compostés est ainsi passée de 1,3 million de tonnes en 1989 à 7,2 en 2006. La France compte à l'heure actuelle près de 900 plates-formes de compostage qui emploient plus de 1 000 salariés [1, 2].

- Traitement biologique
- Déchet
- Risque chimique
- Risque biologique

► *Pascal POIROT, Jérôme GROSJEAN, Nathalie MONTA, Thérèse NICOT, François ZIMMERMANN, INRS, département Ingénierie des procédés*

► *Philippe DUQUENNE, Guylaine GREFF-MIRGUET, Véronique KOEHLER, Cécile PIERNOT, INRS, département Métrologie des polluants*

APPROACHING CHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL RISKS IN THE COMPOSTING SECTOR

This paper draws up a non-exhaustive inventory of the chemical and biological risks, to which employees at composting facilities are subjected. The results reveal the presence of three prime pollutants: total particulate materials (TPM), ammonia and endotoxins. Whilst on average present at concentrations lower than the occupational exposure limit value (OELV), TPM concentrations are significant and, locally, may reach very high levels, depending on the work operation and the workplace configuration. Ammonia concentrations appear to be of greater concern (28% exceeding the OELV) at some enclosed facilities processing urban water purification station sludges. Our research also highlighted that loader filter boxes were inefficient in half the study cases. Endotoxins were present at all sites, sometimes at very high concentrations. Cultivable microorganism concentrations were also highly variable and were observed to reach very high levels, in particular thermophilic bacteria concentrations, for which most measurements exceeded 10^5 UFC/m³ at some composting facilities.

- Biological processing
- Waste product
- Chemical risk
- Biological risk

Ce développement pose des questions sur les risques liés aux agents chimiques et biologiques déjà présents dans les déchets ou produits par le compostage. Les publications concernant les risques encourus par les salariés sont peu nombreuses [3 - 9]. Elles ne répertorient pas ou peu de maladies imputables à ce procédé. La nature des polluants et surtout leur concentration restent méconnues en raison du caractère émergent de l'activité et de la diversité des plates-formes.

L'INRS propose ici de dresser un inventaire non exhaustif des risques chimiques et biologiques dans le secteur du compostage. Les principaux agents chimiques et biologiques présents dans l'air sont identifiés et quantifiés. L'ensemble des données recueillies sur diverses plates-formes doit permettre d'orienter et de définir au mieux les actions de prévention.

DU DÉCHET AU COMPOST

Les déchets compostés sont de deux types : les déchets organiques fermentescibles directement compostables qui représentent la fraction la plus importante en volume et nombre de plates-formes, et les ordures ménagères résiduelles (OMR) qui nécessitent un tri-compostage ou traitement mécano-biologique (TMB).

Le *Tableau 1* résume les principales filières de déchets traités en France en 2005 - 2006 [1].

On appelle « compostage » la transformation en mode aérobie de matière organique en un produit stabilisé et hygiénisé appelé compost. Cette transformation, qui commence dès que les conditions sont réunies (humidité, température, aération) et qui combine réactions chimiques et biologiques, résulte de l'action de micro-organismes (bactéries, moisissures et autres champignons). Elle se poursuit jusqu'à la stabilisation du compost.

Les opérations de compostage comprennent généralement les étapes suivantes :

- réception des déchets,
- pré-traitement (broyage, mélange, tri),
- fermentation,

TABLEAU 1

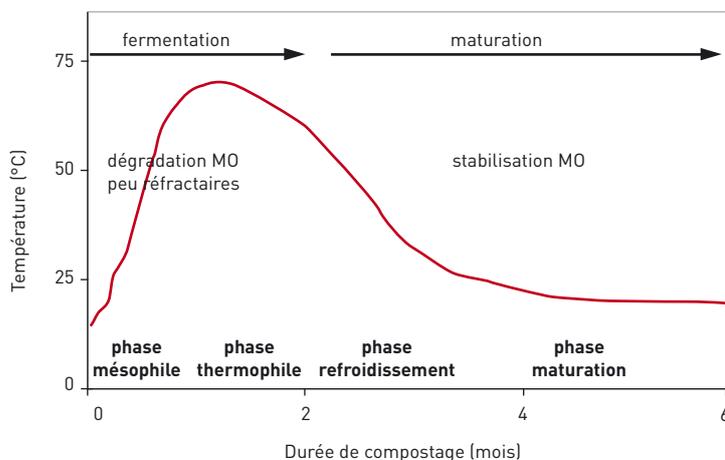
Déchets compostés en France en 2005/2006

	Type de déchets	Déchets en KT	Répartition	Compost en KT	Nombre de plates-formes
Déchets organiques fermentescibles	Déchets verts (1)	6 000	66 %	2 300	820 dont 500 à + de 1 000 t/an
	Bio-déchets ménagers (2)		3 %		
	Boues de station d'épuration (3)		18 %		
	Autres déchets (4)		13 %		
Ordures ménagères	Ordures ménagères résiduelles (5)	1 200		non renseigné	39

- (1) Les déchets verts (DV) sont issus de jardins communaux, privés ou d'entreprises (tontes de gazon, taille de haies, branches d'élagage...).
- (2) Les bio-déchets ménagers sont la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM) issues de la collecte sélective après tri par les ménages.
- (3) Les boues sont essentiellement d'origine urbaine (boues STEP) mais aussi industrielle.
- (4) Les autres déchets, principalement d'origine agricole, proviennent des lisiers, fientes de volailles et sous-produits de l'industrie agroalimentaire...
- (5) Les ordures ménagères résiduelles (OMR) constituent le flux des ordures ménagères collectées traditionnellement restant après tri par les ménages des matériaux recyclables (cartons, verres, emballages plastique et métalliques).

FIGURE 1

Variations de température en fonction des phases du compostage



- post-traitement (criblage du compost frais, extraction des rebuts),
- maturation et affinage,
- stockage du compost mûr (vente, distribution).

Ce processus s'applique généralement à tous les types de déchets. Les déchets verts doivent préalablement subir un broyage. Quant aux boues, elles doivent être mélangées à de la matière structurante (déchets verts, écorces, etc.) pour assurer l'aération de l'ensemble et respecter le rapport carbone/azote. Les phases de fermentation et de maturation constituent les étapes essentielles du processus de compostage et sont représentées *Figure 1*.

Au cours de la fermentation, qui consomme beaucoup d'oxygène surtout pendant la phase thermophile, la température peut monter à plus de 70°C détruisant ainsi les germes pathogènes. Une réduction de l'ordre de 50 à 60 % de la masse des déchets organiques par dégagement de vapeur d'eau et de gaz carbonique est alors observée.

La phase de maturation correspond au ralentissement de l'activité. Le compost est mûr lorsqu'il est stable. Suivant les procédés de compostage, qui peuvent varier selon les plates-formes, la durée du processus varie de 4 à 6 mois.

PLATES-FORMES ET PROCÉDÉS DE COMPOSTAGE

Il existe plusieurs types de plates-formes de compostage. Ils diffèrent suivant la nature des déchets – même si les installations multi-déchets sont de plus en plus nombreuses –, la quantité de déchets à traiter et les techniques d'exploitation [3, 10, 11]. Les plates-formes peuvent être en système clos (bâtiment fermé), mi-clos (hall avec portes ouvertes) ou à l'air libre. Dans la plupart des cas, la phase de fermentation s'effectue soit en système clos soit en système mi-clos. En revanche, dans la plupart des installations, la phase de maturation du compost est faite à l'air libre.

Les procédés de compostage peuvent différer suivant la nature des déchets et les critères retournement/aération de la matière durant la phase de fermentation [1, 4] :

- aération naturelle statique P1 : ce procédé « rustique » ne permet pas une aération suffisante des andains (tas de compost de section triangulaire ou trapézoïdale) ; il est peu utilisé dans les entreprises ;

- aération forcée par soufflerie P2 ou par aspiration P3 : un réseau de drains au sol insuffle ou aspire de l'air au travers des andains ;

- procédé semi-dynamique P4 : l'aération des andains est assurée par retournement régulier grâce à des engins motorisés type chargeuses sur pneus ou à bras télescopique ;

- procédé dynamique avec fermentation semi-accélérée par roue pelleuse P5 ou par retourneur automatique de compost P6 : ces procédés SILODA® brevetés, conçus pour les bio-déchets et les OMR, assurent la fermentation semi-accélérée en 3 ou 4 semaines environ ;

- procédé dynamique P7 : le début de la fermentation est accéléré par BRS (bio réacteur stabilisateur). Ce procédé, utilisé pour le compostage des OMR, permet en outre d'homogénéiser les déchets entrants et d'amorcer la fermentation qui se poursuivra en andains classiques ;

- en enceinte close ou digesteur : ce procédé s'utilise principalement pour les bio-déchets ménagers. Peu développé, il n'a pas été rencontré lors de cette étude.

Les procédés les plus représentés en France sont ceux qui associent l'aération forcée et le compostage semi-dynamique avec utilisation de chargeuses, notamment pour les déchets verts et les boues, soit P2 ou P3 + P4.

Remarque : ces procédés peuvent être combinés sur une même plate-forme.

RISQUES CHIMIQUES POTENTIELS

La littérature indique que les salariés sont susceptibles d'être exposés par voies respiratoires ou cutanées à différentes sortes d'agents chimiques.

LES AGENTS PRÉSENTS DANS LES DÉCHETS ENTRANTS

Parmi ces composés figurent notamment les éléments traces métalliques (ETM), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphenyls (PCB) et les pesticides. Les HAP et les PCB ont déjà été dosés à l'état de traces dans les déchets entrants, notamment les boues qui font l'objet d'un contrôle en amont du compostage éventuel. Quelques auteurs rapportent la présence, en très faible quantité, de pesticides, notamment dans les déchets verts [3].

LES ÉMISSIONS GAZEUSES DUES AU COMPOSTAGE

Dioxyde (CO₂) et monoxyde de carbone (CO)

Le processus de fermentation aérobie émet essentiellement du gaz carbonique en grande quantité. Selon plusieurs études [4, 12], 50 % du carbone organique des déchets est transformé en CO₂. Ce gaz non toxique peut cependant faire baisser le pourcentage d'oxygène dans les locaux clos. Le monoxyde de carbone est très peu cité. Les émanations de moteurs thermiques des engins dans un hall fermé de fermentation peuvent également contribuer à la présence de ce gaz [5, 8].

Ammoniac (NH₃)

Ce gaz est émis lors de la phase de montée en température du compost et après chaque retournement des andains [12]. Les bâtiments fermés favorisent sa concentration [5, 8].

Sulfure d'hydrogène (H₂S) et mercaptans

En principe, ces composés soufrés sont émis en faible proportion quand le processus de compostage fonctionne bien. Cependant, en cas de dysfonctionnement de ventilation, la fermentation peut devenir anaérobie et conduire alors au dégagement de ces composés [5, 8].

Oxydes d'azote (NOx)

Les émissions d'oxyde et de dioxyde d'azote sont souvent inférieures aux normes même en système clos. Le protoxyde d'azote (N₂O), gaz le plus souvent cité, peut être émis surtout en fin de compostage [5, 8, 12].

Composés organiques volatils (COV)

Les COV, dans les composts et l'air ambiant à proximité, sont essentiellement liés au processus de compostage et se retrouvent le plus souvent en faibles concentrations [3, 6, 13, 14].

Le méthane (CH₄) est rarement évoqué parmi les polluants gazeux potentiellement présents. Il peut pourtant s'en dégager en cas de dysfonctionnement de la ventilation (manque d'oxygène), la transformation des matières organiques s'effectuant alors en mode anaérobie (procédé de méthanisation) [12].

LES POUSSIÈRES OU MATIÈRES DE PARTICULES TOTALES (MPT)

Les poussières sont principalement produites par des actions physiques, par exemple mécaniques sur les déchets et composts. Les principales sources d'émission de poussières sont d'abord la zone de réception et de pré-traitement des déchets, puis la zone de fermentation lors de retournement d'andains, la zone de criblage du compost et, d'une façon générale, tous les endroits de déplacement ou de conditionnement du produit fini. La plupart de ces opérations s'effectue par engin mécanisé, avec ou sans cabine pressurisée, ou par engin télécommandé souvent à l'air

libre. La littérature, plutôt rare sur le sujet, présente des résultats hétérogènes [3, 5, 8, 15]. D'après les responsables de quelques plates-formes visitées avant les campagnes de mesure, les dégagements de poussières, notamment en période sèche, semblent être la nuisance principale.

RISQUES BIOLOGIQUES POTENTIELS

Le principe du compostage repose sur la dégradation des matières organiques sous l'action des micro-organismes. Le compost contient donc des bactéries et des champignons dont le rapport varie au cours du compostage. Au commencement du processus, la dégradation des composés facilement biodégradables (glucides, lipides...) est assurée par une flore à dominante bactérienne. Par la suite, la dégradation des polymères (lignines, celluloses) est assurée par une flore thermophile essentiellement composée de moisissures et d'actinomyètes.

Les flores microbiennes intervenant dans le compostage ainsi que les composés qu'elles produisent peuvent être mis en suspension dans l'air et pré-

senter un risque infectieux, allergique ou toxique pour les salariés. À l'heure actuelle, il existe assez peu d'informations relatives à l'évaluation quantitative de ces risques. En revanche, l'exposition des salariés aux bio-aérosols lors des opérations de compostage des déchets est bien documentée [16].

ASPECT MÉTHODOLOGIQUE

LES PLATES-FORMES DE COMPOSTAGE

Les entreprises visitées ont été sélectionnées avec le concours de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) qui disposait d'une base de données comptant 820 plates-formes de compostage, de la Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement (FNADE) et des Caisses d'Assurance Retraite et de la Santé au Travail (Carsat). Des visites préliminaires ont permis d'étudier la faisabilité d'une intervention. Les plates-formes non couvertes ont été volontairement écartées de l'étude en raison de contraintes météorologiques.

Douze campagnes de mesure ont été réalisées dans dix entreprises représen-

tatives par rapport aux types de déchets entrants et au procédé de compostage. Les interventions concernant les plates-formes A et B, initialement effectuées en période hivernale, ont été reconduites en saison estivale (A2 et B2) de manière à estimer l'influence des conditions climatiques sur les concentrations en polluants. Dans l'ensemble, les installations sont relativement importantes puisque six d'entre elles traitent plus de 30 000 tonnes de déchets par an. Les entreprises ont été classées par ordre chronologique des interventions et par principal type de déchet composté.

Les installations mono-déchets sont peu nombreuses (A, G et J). Ainsi, certaines plates-formes classées "déchets verts" compostent également des boues (dans un hall commun pour E et dans un hall spécifique pour I) alors que d'autres plates-formes compostant des boues, des bio-déchets ou des OMR (B, D et F) réceptionnent également des déchets verts pour en faire un compost végétal, plus "noble" et plus facile à valoriser. Le *Tableau II* résume les caractéristiques des entreprises.

Les installations compostant des déchets verts (A, E et I) et des boues de station (B, C et H) sont des plates-formes classiques par rapport au procédé utilisé (retournement des andains par chargeuse et aération forcée) et comprennent, pour la plupart d'entre-elles, des bâtiments fermés, halls couverts et des aires de stockage à l'air libre où évoluent

TABLEAU II

Caractéristiques des plates-formes de compostage

Entreprise	Type de plate-forme, lieu de fermentation	Déchet principal (secondaire)	Quantité totale T/an	Procédé de compostage	Procédé de compostage	Nombre de points de prélèvements en ambiance		
						Clos	Mi-clos	Air libre
A	serres : clos / mi-clos	DV	< 5 000	aération forcée par soufflerie + retournement par chargeuse	P2 + P4	3		
B	hall : clos / mi-clos	boues step, (DV)	13 000	aération forcée par soufflerie et aspiration + retournement par chargeuse	P2, P3 + P4	1	2	2
C	usine : clos	boues step, (déchets bois)	13 500	aération forcée par soufflerie ou aspiration + retournement par chargeuse	P2 ou P3 + P4	5		
D	usine : clos / mi-clos	bio-déchets, (DV)	7 000	aération forcée par soufflerie + retournement par roue pelleuse	P2 + P5	5		
E	hall : clos / mi-clos	DV + Boues step, (autres)	36 000	aération forcée par soufflerie + retournement par chargeuse	P2 + P4	4		2
F	usine : clos / mi-clos	OMR, (DV)	36 000	aération forcée par soufflage + retourneur automatique de compost	P2 + P6	4	3	
G	usine : clos / mi-clos	OMR	35 000	BRS	P7	5	2	
H	usine : clos / mi-clos	boues step, (déchets bois)	42 000	aération forcée par aspiration + retournement par chargeuse	P3 + P4	7		
I	hall : clos / mi-clos	DV, (boues step)	43 000	aération naturelle + retournement par chargeuse	P4	4	2	1
J	usine méthanisation : close	digestat OMR	60 000	aération forcée par soufflage + retournement par chargeuse	P2 + P4	8		

les chargeuses transférant la matière. Le plus souvent, le mélange des matières et la fermentation s'effectuent en intérieur alors que la maturation du compost se fait en extérieur. Selon le type de cribleur, mobile ou fixe, le compost est criblé en intérieur (C et H) ou en extérieur sur les autres plates-formes. Il faut préciser que les bâtiments ou halls ne sont fermés que très rarement en période de travail ; la plupart du temps au moins une porte laissant l'accès aux chargeuses est ouverte. *A contrario*, l'usine C présente la particularité d'être constituée d'un seul bâtiment entièrement clos.

Les unités traitant les bio-déchets (D) et des OMR (F, G) sont, quant à elles, des installations plus complexes pouvant être qualifiées d'usines puisqu'elles sont équipées de divers systèmes automatisés pour le procédé de fermentation (retourneur automatique de compost, BRS...), pour l'acheminement et le tri des matières. Le travail avec chargeuse sur pneus est fortement réduit dans ces installations.

L'entreprise J est une usine de méthanisation d'OMR dont le digestat (résidu valorisable sortant du digesteur) est com-

posté plus rapidement (phase de maturation) dans un hall complètement clos avec transfert du compost d'un box à l'autre par chargeuse sur pneus.

Dans tous les cas, les bâtiments fermés sont équipés de système de ventilation par aspiration situé sous la toiture. Les plates-formes, à l'exception de I, sont également équipées, pour la phase de fermentation, d'une aération forcée au sol soit par aspiration, soit par soufflage à travers les andains.

Les plates-formes de compostage emploient en moyenne 3 salariés. La conduite des engins (chargeuse sur pneus, mélangeuse, retourneur d'andain...) représentent environ 80 % du temps de travail des opérateurs. Les cabines sont équipées de filtres. Par ailleurs, le travail des salariés est très varié – pose de sonde sur les andains, pilotage de dispositifs fixes ou mobiles comme des grappins pour les OMR, des broyeurs, des cribleurs, des trommels, entretien divers, intervention sur ces mêmes dispositifs en cas d'incident – rendant l'exposition potentielle très variable.

STRATÉGIE DE PRÉLÈVEMENTS ET MESURES

Pour chaque entreprise, les mesures chimiques et biologiques ont été réalisées respectivement durant 3 et 2 jours consécutifs à partir du mardi. En raison des effectifs réduits et de la polyvalence des salariés au travail, il est souvent difficile d'identifier les postes à risques sur une plate-forme. Ces particularités ont conduit à privilégier et à multiplier les prélèvements en ambiance au détriment des prélèvements individuels.

Les prélèvements d'air à poste fixe à une hauteur de 1,70 mètre regroupant l'ensemble des dispositifs de prélèvements chimiques et microbiologiques ont été réalisés à différents endroits proches des sources potentielles de pollution tels que la réception des déchets, le broyage, les halls de fermentation/maturation, le criblage... Sur l'ensemble des plates-formes, 75 % des mesures ont été effectuées en intérieur, le reste dans des endroits couverts type hall ou totalement en extérieur, notamment pour les opérations de broyage et criblage.

TABLEAU III

Valeurs limites d'exposition des contaminants chimiques

Polluant	FRANCE				USA (ACGIH)				VLEP (UNION EUROPÉENNE)			
	VME		VLE		TLV-TWA		TLV-STEL		8 heures		Courte durée	
	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
MPT		10										
Aluminium (métal)	-	10	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
Cadmium (métal)	-	0,05	-	-	-	0,01	-	-	-	-	-	-
Chrome (métal)	-	2	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-
Cuivre (poussières)	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
Fer	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Magnésium	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Manganèse (fumées)	-	1	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-	-
Nickel (métal)	-	1	-	-	-	1,5	-	-	-	-	-	-
Plomb (métal)	-	0,1	-	-	-	0,05	-	-	-	-	-	-
Zinc (métal)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Isopropanol	-	-	400	980	200	-	400	-	-	-	-	-
MEK	200	600	300	900	200	-	300	-	-	-	-	-
Acétate d'éthyle	400	1400	-	-	400	-	-	-	-	-	-	-
Benzène	1	3,25	-	-	0,5	-	2,5	-	-	-	-	-
Disulfure de diméthyle	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
Toluène	50	192	100	384	50	188	-	-	50	192	80	306
Cycloheptatriène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylbenzène	20	88,4	100	442	100	-	125	-	-	-	-	-
Xylènes	50	221	100	442	100	434	150	651	50	221	100	442
d-Limonène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydrogène sulfuré	5	7	10	14	10	-	15	-	-	-	-	-
Ammoniac	10	7	20	14	25	-	35	-	20	14	50	36

Des prélèvements chimiques ont également été réalisés dans les cabines des chargeuses sur pneus et des mélangeuses. Les prélèvements individuels, peu nombreux et sur la base du volontariat, ont concerné les salariés chargés de l'entretien en poste de jour et les conducteurs d'engin.

PRÉLÈVEMENTS CHIMIQUES

Les valeurs limites d'exposition des agents chimiques dosés figurent dans le *Tableau III*.

Les MPT

Les poussières totales ont été prélevées sur capsule ACCU-CAP avec membrane en PVC (diamètre 37 mm) montée sur cassette fermée à un débit de prélèvement de 2 l/min ($\pm 5\%$) sélectionnant la fraction inhalable de l'aérosol durant 7 à 8 heures. La concentration pondérale en MPT est mesurée par gravimétrie à hygrométrie compensée.

Les ETM

L'analyse et le dosage des métaux contenus dans les poussières ont été réalisés par un spectromètre ICP après solubilisation de la membrane de la capsule ACCU-CAP dans l'acide perchlorique.

Les COV

Les COV ont été prélevés sur tube de charbon actif (SKC 226-06) à un débit de 200 ml/min ($\pm 5\%$) pendant 7 à 8 heures. Après désorption par du sulfure de carbone, l'analyse qualitative a été effectuée par couplage chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse (GC-MS) et l'analyse quantitative des composés identifiés par chromatographie en phase gazeuse (GC).

L'ammoniac

L'ammoniac (NH_3) a été prélevé sur filtre de quartz imprégné d'acide sulfurique et monté sur cassette fermée double étage à un débit de prélèvement de 1 l/min pendant 4 heures au maximum. L'analyse a été réalisée par chromatographie ionique [17]. Les concentrations en ammoniac ont également été mesurées en continu par un appareil Dräger équipé d'un détecteur électrochimique, notamment sur les plates-formes A et B.

L'hydrogène sulfuré

Les vapeurs d'hydrogène sulfuré (H_2S) ont été prélevées sur une cassette de 37 millimètres de diamètre contenant deux filtres de quartz imprégnés d'acétate de cadmium à un débit de prélèvement de 0,05 l/min pendant environ 7 heures. L'analyse a été réalisée par spectrophotométrie d'absorption moléculaire dans le visible, à la longueur d'onde de 670 nm [18]. Il faut noter que cette méthode n'est pas spécifique et que des interférences sont possibles avec d'autres sulfures. Les prélèvements d' H_2S n'ont été effectués que dans l'entreprise H.

Appareils à lecture directe

L'utilisation d'appareils type Dräger ou GfG à lecture directe équipés de détecteurs électrochimiques a permis de mesurer en continu des concentrations de vapeurs de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO_2), d'ammoniac (NH_3) et d'hydrogène sulfuré (H_2S) en un point supposé pollué de chaque entreprise. Ces appareils sont des détecteurs de gaz dont la précision et le fonctionnement sont optimaux dans le domaine de mesure proche des concentrations de calibrage qui sont plus élevées que les VME.

PRÉLÈVEMENTS POUR ANALYSE MICRO-BIOLOGIQUE

Les bio-aérosols associés au compostage ont été mesurés aux mêmes endroits, en même temps que les polluants chimiques, mais sur une durée de deux jours. Deux paramètres microbiens, les endotoxines et les micro-organismes cultivables, ont été mesurés simultanément avec deux capteurs différents dont l'orifice était orienté vers les andains.

Les endotoxines

Les endotoxines ont été prélevées par filtration à l'aide de cassettes fermées équipées de membranes en fibre de verre apyrogène de 37 mm et d'un pré-filtre. Les prélèvements ont été effectués au débit de 2 l/min pendant une durée variant d'une à deux heures. L'analyse des échantillons comprend un prétraitement par extraction dans 10 ml d'eau apyrogène puis le dosage de l'agent [19]. Le dosage des endotoxines dans l'extrait a été effectué par la méthode au Lysat d'Amoebocytes de Limules (LAL).

Flore cultivable mesurée par filtration

Les micro-organismes cultivables ont été prélevés à l'aide de cassettes fermées équipées d'une membrane en polycarbonate (37 mm ; 0,8 μm) et d'un pré-filtre. Les prélèvements ont été effectués au débit de 2 l/min pendant une durée variant d'une à deux heures. Les échantillons ont subi une étape d'extraction dans 10 ml de liquide stérile (0,01 % de Tween 80, 0,1 % de peptone, eau). Le dénombrement des micro-organismes cultivables dans l'extrait a été effectué sur le milieu TSA incubé à 25°C (bactéries mésophiles) et à 56°C (bactéries thermophiles) et sur le milieu MEA incubé à 25°C (moisissures mésophiles) et à 47°C (moisissures thermophiles).

RÉSULTATS CHIMIQUES

LES HAP ET PCB

Les HAP et PCB n'ont pas été dosés. Toutefois, ils peuvent être présents dans les boues d'épuration. Les boues entrantes sont soumises à des normes qui fixent les seuils maximaux admissibles à 1,5 et 0,8 mg/kg de matière respectivement pour le benzo(a)pyrène (Bap) et une somme de 7 PCB. On peut donc en déduire l'exposition des salariés. Ainsi, en supposant que les seuils maximaux soient atteints et en admettant un empoussièrément du lieu de travail au niveau de la VME (10 mg/m³), les poussières des plates-formes ne contiendraient que 15 ng/m³ de Bap, – 10 fois moins que la VLEP (150 ng/m³) – et 8 ng/m³ de PCB à 54 % de chlore – une concentration négligeable par rapport à la VLEP (500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Ces déductions suggèrent que l'exposition des salariés aux concentrations atmosphériques de ces substances chimiques est probablement négligeable.

LES MPT ET ETM

Les concentrations en MPT sont présentées dans le *Tableau IV*. En moyenne et à poste fixe, elles sont toutes inférieures à la VME, nonobstant des écarts significatifs entre les plates-formes. Sur 210 mesures, 8 valeurs sont supérieures à la VME, dont 7 mesurées en intérieur. Elles correspondent soit à

TABLEAU IV

Concentrations en matières particulaires totales

Entreprise	Déchet principal	MPT : concentration en mg/m ³									
		Ambiance				Cabine engin			Prélèvements individuels		
		n (n>VME)	Moy	Max	Écart type	n	Moy	Max	n	Moy	Max
A hiver	DV	13	0,7	1,6	0,5						
A été	DV	12	1,8	5,4	1,4						
B hiver	boues	11	0,3	0,5	0,2						
B été	boues	15 (1)	3,3	22,1	5,4						
C	boues	19 (3)	6,8	13,6	3,5			8 (cabine)	0,8	2,1	
D	bio-déchets	16	0,5	d	0,4	3	1,1	2,2			
E	DV + boues	18	2,8	5,7	1,6	3	0,5	0,7			
F	OMR	21	0,5	1,6	0,5	2	0,4	0,5	2	2,3	3,4
G	OMR	20	0,8	4,4	1,1	3	0,2	0,2	2	0,8	1,1
H	boues	20	0,2	0,8	0,1	8	0,6	1,4	2	4,6	8,0
I	DV	21	0,6	4,6	1,1	9	0,4	1,3			
J	digestat OMR	24 (4)	4,8	15,4	4,8						

TABLEAU V

Concentrations en MPT hiver/été

Entreprise	Principal type déchet	MPT : concentration en mg/m ³						Conditions atmosphériques (3 jours)	
		Toutes opérations		Sans criblage		Criblage		T en °C	HR en %
		n	Moy	n	Moy	n	Moy		
A hiver	DV	13	0,7	13	0,7	/	/	8,5	88
A été	DV	12	1,8	10	1,8	2	3,1	22,5	54
B hiver	boues	11	0,3	9	0,3	2	0,1	10,0	90
B été	boues	15	3,3	13	1,7	2	13,8	18,5	62

TABLEAU VI

Concentrations en métaux

Entreprise	Déchet principal	ETM : concentration moyenne en µg/m ³												C max	
		n	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	Zn	Al	Fe	
A hiver	DV	13	13,3	n.d.	n.d.	3,9	8,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4,8	101,0	21,8	
A été	DV	12	35,4	0,1	0,8	1,9	46,5	10,7	1,2	1,2	3,1	1,8	92,7	117,3	
B hiver	boues	11	8,3	n.d.	n.d.	1,2	2,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,6	82,3	17,1	
B été	boues	15	77,7	0,1	0,2	1,4	48,1	20,1	1,1	10,7	0,5	2,7	391,7	280,1	
C	boues	27	39,1	0,2	0,2	2,1	164,7	17,3	0,9	0,3	0,8	5,1	110,0	685,0	
D	bio-déchets	18	9,9	0,1	0,1	1,3	7,4	4,3	0,3	<0,1	0,2	1,2	28,3	26,3	
E	DV + boues	21	29,8	<0,1	0,1	1,5	34,1	10,0	0,9	0,1	<0,1	1,7	75,1	73,7	
F	OMR	25	10,3	<0,1	0,3	0,0	10,8	5,3	0,7	2,6	<0,1	0,4	55,5	65,2	
G	OMR	24	8,9	<0,1	0,2	0,0	7,9	4,3	0,6	0,1	<0,1	1,3	63,7	42,3	
H	boues	30	1,5	<0,1	0,1	0,9	25,3	1,9	0,2	0,5	0,5	3,3	75,1	73,7	
I	DV	30	10,6	<0,1	0,3	0,2	8,1	2,0	0,3	0,6	0,4	0,4	99,7	69,5	
J	digestat OMR	24	66,9	<0,1	0,4	1,1	54,6	18,8	1,3	<1	0,8	5,2	342,6	267,5	

des zones de mélange de déchets (boues + structurant) pour l'usine C, soit à une zone d'affinage de compost avec criblage dans l'usine J. Dans les deux cas, des chargeuses sur pneus transféraient la matière. La concentration la plus élevée (22 mg/m³) correspond à un criblage en extérieur (B en été). La valeur de 5,5 mg/m³ relevée le lendemain pour la

même opération montre que les concentrations en extérieur évoluent au cours du temps et en fonction des conditions climatiques (direction et vitesse des vents). Sur les autres plates-formes aussi, les concentrations en MPT varient sensiblement selon l'endroit et l'activité.

Influence de la saison

Pour les deux plates-formes étudiées, A et B, les concentrations en MPT étaient, hors opération de criblage, plus élevées en été qu'en hiver (cf. Tableau V). Il faut cependant préciser que l'activité était également plus importante en été, en particulier sur le site B, et qu'il est difficile d'imputer cette différence aux seuls facteurs saisonniers.

Empoussièremment dans les cabines

Dans l'ensemble, les mesures dans les cabines d'engins équipés de filtres anti-poussières montrent que les concentrations y sont faibles, même en milieu très empoussiéré, notamment dans l'usine C, où l'on observe un facteur de protection d'environ 8,5 résultant d'un fonctionnement avec portes et vitres fermées. Cependant, tous les engins, en particulier les chargeuses, étant générateurs d'empoussièremment au niveau des pneus (sur sol sec) et du godet (prise et dépose de matière), les concentrations dans les cabines peuvent être supérieures à la concentration moyenne mesurée en ambiance quand les engins ne sont pas équipés de filtres ou s'ils circulent fenêtres ouvertes (entreprises D et H).

Exposition des salariés

Les prélèvements individuels de MPT indiquent que l'exposition moyenne des salariés « non conducteurs » est inférieure à la VME, bien qu'elle ne soit

pas négligeable. En fonction du type de travail et de l'endroit, le personnel polyvalent, généralement sans protection respiratoire, peut être fortement exposé jusqu'à 8 mg/m³ pour un agent d'entretien réparant un trommel.

Les métaux

Les concentrations moyennes en µg/m³ des éléments traces métalliques sont présentées *Tableau VI*. Quel que soit le type de compost, les concentrations dans les poussières aéroportées sont faibles, voire négligeables pour certains métaux. Les éléments prépondérants sont l'aluminium et le fer.

LES COV

Le *Tableau VII* rassemble les résultats des prélèvements de COV en ambiance. Les concentrations mesurées des différents polluants organiques sont, pour la plupart, inférieures à 0,1 mg/m³ dans l'ensemble des plates-formes conventionnelles. En revanche, les concentrations des prélèvements réalisés lors du compostage du digestat d'OMR dans l'usine J sont plus élevées. Parmi les COV dosés, on notera la prépondérance (relative) des composés terpéniques, comme le limonène et l' α -pinène, due aux déchets verts et de composés aromatiques en C7 et C8. L'analyse par GC-MS a mis en évidence de nombreux micro-

polluants organiques en très faibles quantités et non dosés (essentiellement des terpènes et dérivés terpéniques en C10). D'autres COV, aldéhydes, acides organiques, composés organiques sulfurés..., n'ont pas été détectés alors qu'ils étaient vraisemblablement présents. Les concentrations en COV totaux sont donc sous-évaluées dans cette étude, ce qui est toujours le cas avec le type de support utilisé pour les prélèvements (spécifiques des aldéhydes et des acides organiques). Il faut cependant préciser que la technique de prélèvement utilisée (mesure sur 8 heures) permet une comparaison avec les VME, même si beaucoup de COV, notamment les terpènes, en sont dépourvues.

TABLEAU VII

Concentrations en COV

Entreprise	Déchet principal	COV : concentration moyenne en mg/m ³					
		n	Alcools	Cétones	Aromatiques	Terpènes	Total COV
A hiver	DV	9	n.d.	0,03	0,04	0,38	0,45
A été	DV	13	n.d.	0,03	0,04	0,26	0,33
B hiver	boues	11	n.d.	0,03	0,14	0,05	0,21
B été	boues	16	n.d.	0,03	0,06	0,03	0,12
C	boues	14	n.d.	0,29	0,51	0,39	1,19
D	bio-déchets	18	n.d.	0,03	0,04	0,23	0,30
E	DV + boues	20	n.d.	0,03	0,04	0,07	0,14
F	OMR	23	n.d.	0,06	0,10	0,74	0,90
G	OMR	24	n.d.	0,03	0,21	1,27	1,52
H	boues	21	0,02	0,06	0,04	0,06	0,17
I	DV	21	0,10	0,18	0,04	0,30	0,61
J	digestat OMR	24	5,59	1,93	0,37	3,10	10,99

L'AMMONIAC

Environ 300 prélèvements ont été réalisés sur les plates-formes C à J. Les résultats présentés *Tableau VIII* montrent que de l'ammoniac est présent dans l'air ambiant. Aussi 28 % des concentrations mesurées en ambiance sont-elles supérieures à la VME. Il convient néanmoins de distinguer les niveaux de concentrations selon les types de déchets et le confinement des halls.

Compostage des boues

Les concentrations très élevées en ammoniac ont été mesurées sur les plates-formes C et H compostant principalement des boues de STEP urbaines avec

TABLEAU VIII

Concentrations en ammoniac

Entreprise	Déchet principal	Ammoniac : concentration en ppm															
		Ambiance tous points				Ambiance fermentation				Cabines engins				Prélèvements individuels			
		n (n>VME)	Moy	Max	Écart type	n (n>VME)	Moy	Max	Écart type	n (n>VME)	Moy	Max	Écart type	n (n>VME)	Moy	Max	Écart type
A hiver	DV	3*	< 1	< 1													
A été	DV	3*	< 1	< 1													
B hiver	boues	3*	2,6	6,0													
B été	boues	3*	6,2	12,1													
C	boues	10 (10)	58,29	81,60	17,11	6 (6)	65,40	81,60	9,80	4 (2)	26,90	51,60	26,84	7 (3) cabine	22,44	48,60	19,74
D	bio-déchets	20	2,08	4,61	1,17	12	2,30	4,61	1,26	5	1,98	3,69	1,02				
E	DV + boues	26	3,55	7,54	2,60	18	5,06	7,54	1,55	4	0,63	0,77	0,10				
F	OMR	26	0,18	0,59	0,13	8	0,24	0,59	0,16	4	0,09	0,13	0,03				
G	OMR	28	0,06	0,11	0,01	19	0,06	0,08	0,01	4	0,11	0,18	0,05				
H	boues	34 (19)	12,47	39,50	7,32	34 (19)	12,47	39,50	7,32	12 (3)	8,67	13,01	3,25	5 (1)	8,29	20,18	2,54
I	DV	35	1,59	6,00	1,64	20	1,62	6,00	1,74	15	0,16	0,29	0,07				
J	digestat OMR	40 (32)	27,58	51,21	12,68	30 (30)	34,20	51,21	5,76	5 (3)	14,6	24,3	7,1	11 (8) cabine	15,8	30,0	8,2

* Mesurages réalisés sur une durée moyenne de 6 à 7 heures par appareil à lecture directe

TABLEAU IX

Concentrations en endotoxines

Entreprise	Déchet principal	Endotoxine (UE/m ³)								
		Nbre de valeurs	Médiane	Min	Max	Nbre > 50	Nbre > 200	Nbre valeur > 10 X ref moyen	Nbre valeur > 30 X ref moyen	
A 1	DV	7	2,1	1,1	12,9	0	0	0	0	
A 2	DV	15	59,5	10,7	4075,9	10	5	6	3	
B 1	boues	5	0,2	0,0	0,3	0	0	ND	ND	
B2	boues	15	236,1	18,7	701,7	13	10	13	13	
C	boues	0	non déterminé							
D	bio-déchets	15	1 426,6	519,1	5 406,8	15	15	6	0	
E	DV + boues	23	2 407,2	26,4	27 561,2	21	15	7	2	
F	OMR	20	9,1	0,5	80,7	3	0	5	3	
G	OMR	21	8,6	0,4	125,4	3	0	0	0	
H	boues	18	163,3	28,0	1 954,5	17	7	3	0	
I	DV	17	25,9	8,0	295,6	4	1	1	0	
J	digestat OMR	21	64,3	4,9	487,3	13	4	21	20	

procédé classique de fermentation par aération forcée au sol et retournement par chargeuse. Dans l'usine C, de configuration entièrement close, la concentration moyenne en ambiance était de 58 ppm, soit près de six fois la VME. Des concentrations supérieures à la VME, mais plus faibles, ont également été mesurées dans l'usine H, qui est du même type (13 ppm en moyenne), alors que le volume des boues traitées était beaucoup plus important. Toutefois, dans cette usine, toutes les portes du bâtiment avaient été ouvertes afin de dissiper l'épais brouillard engendré par le compost.

Compostage de déchets verts

Les concentrations en ammoniac sur les plates-formes traitant des déchets verts (E, I) étaient en moyenne inférieures à la VME, la plupart des mesures ayant été réalisées en milieu non confiné. Concernant la plateforme E, non spécifique en raison de la présence de boues, la concentration moyenne était de 3,5 ppm sur l'ensemble du site et de 5 ppm dans le hall de fermentation. Dans tous les cas, les valeurs maximales se retrouvaient à proximité des andains de compost à base de boues. Ainsi, dans le hall spécifique de compostage de boues de l'entreprise I, la concentration moyenne en ammoniac a été mesurée à 3,2 ppm alors qu'elle n'était que de 0,7 ppm dans les zones réservées aux déchets verts.

Compostage d'OMR et de bio-déchets

Le compostage direct des OMR (F, G) et des bio-déchets ménagers (D) ne

semble pas engendrer de concentrations élevées en ammoniac même si une valeur maximale de 4,6 ppm a été enregistrée à proximité du criblage dans l'usine D.

Compostage du digestat d'OMR après méthanisation

En revanche, dans l'usine de méthanisation J, toutes les concentrations mesurées dans le hall clos de compostage du digestat d'OMR sont supérieures à la VME, la moyenne étant de 34 ppm. L'étape de méthanisation est probablement à l'origine de la formation d'ammoniac par réduction de l'azote.

Exposition à l'ammoniac dans les cabines des engins

Globalement, les concentrations mesurées dans les cabines des chargeuses ainsi que l'exposition individuelle sont en rapport avec les niveaux de pollution des milieux ambiants correspondants. Si les concentrations en ammoniac sont faibles dans les cabines des engins évoluant sur les plates-formes de déchets verts (2 ppm en moyenne pour E), de bio-déchets et d'OMR, il n'en est pas de même pour les chargeuses circulant sur les plates-formes très polluées (C, H et J). Les résultats du *Tableau VIII* montrent que 50 % des valeurs, qu'elles soient individuelles ou mesurées dans les cabines, sont nettement supérieures à la VME exposant de fait les conducteurs ne portant pas d'appareil de protection respiratoire. Ces niveaux révèlent, dans la plupart des cas, l'inef-

ficacité du média filtrant de la cabine. L'exemple de l'usine C est typique. La concentration moyenne dans la cabine de l'un des engins dont le système de filtration fonctionnait était de 6 ppm tandis qu'elle s'élevait à 46 ppm dans la cabine d'un second engin dont la filtration était hors service. Même constat dans l'usine J où seule une chargeuse sur trois disposait d'une filtration permettant de limiter la concentration en cabine à 8 ppm, soit une valeur faiblement inférieure à la VME.

L'HYDROGÈNE SULFURÉ

Les prélèvements réalisés dans l'usine H traitant des boues de STEP urbaines montrent que les concentrations en hydrogène sulfuré sont très faibles, inférieures pour la plupart à 0,1 mg/m³ alors que la VME est de 7 mg/m³.

AUTRES GAZ/APPAREILS A LECTURE DIRECTE

Les détecteurs intégrés aux appareils à lecture directe ont confirmé la présence d'ammoniac, notamment sur les plates-formes de compostage de boues. Sur la plate-forme B en été, une concentration moyenne de 6 ppm a été mesurée en extérieur couvert à proximité d'un andain de boue en fermentation (*cf. Tableau VIII*). Ces appareils ont ponctuellement permis d'évaluer des pics de pollution en ammoniac et en hydrogène sulfuré sur une minute (3 ppm lors d'un retournement d'andain de boues sur la plate-forme I). Les moteurs thermiques des engins de l'usine C seraient responsables des concentrations à 16 ppm de monoxyde de carbone mesurées notamment en milieu confiné.

RÉSULTATS MICROBIOLOGIQUES

LES ENDOTOXINES

Les résultats présentés dans le *Tableau IX* révèlent que près de 56 % des mesures d'endotoxines aéroportées sur l'ensemble des sites visités sont supérieures à 50 UE/m³. De même, 32 % de ces valeurs dépassent 200 UE/m³,

une concentration non négligeable. Les valeurs peuvent être très importantes et varier fortement d'une plate-forme à l'autre jusqu'à atteindre 27 500 UE/m³ sur le site E. Toutes les concentrations mesurées sur le site D sont supérieures à 500 UE/m³ alors qu'elles sont plutôt faibles sur les sites F et B (en hiver).

Les concentrations varient aussi sur une même plate-forme d'un point de prélèvement à l'autre. Par exemple, sur le site H, les concentrations mesurées dans la zone de déchargement des boues sont 6 à 11 fois inférieures à celles de la zone de criblage (cf. Figure 2). Pour une même zone d'activité, les concentrations en endotoxines varient considérablement selon la saison. Des prélèvements sur la plate-forme de compostage A lors d'activités similaires montrent des concentrations significativement plus élevées en été qu'en hiver ($p = 0,0405$).

LES BACTÉRIES ET LES MOISSURES CULTIVABLES

À l'instar des endotoxines, les concentrations en bactéries et en moisissures cultivables varient fortement d'une plate-forme à l'autre et d'un groupe microbien à l'autre. Les concentrations en bactéries cultivables sont supérieures à celles mesurées pour les moisissures cultivables (cf. Tableaux X et XI). Dans le cas des bactéries mésophiles (à 25°C) par exemple, 37 % des valeurs sont supérieures à 105 UFC/m³ contre seulement 12 % pour les moisissures dans les mêmes conditions.

Les valeurs mesurées peuvent être très importantes. Les plus élevées ont été observées pour les bactéries thermophiles (à 56°C) sur le site I (8×10^7 UFC/m³) et la majorité des mesures effectuées sur les sites A (été), B (été), C, E et J montrent des concentrations supérieures à 105 UFC/m³. Les données relatives au site E, où la fermentation se faisait dans un hall fermé, les activités de maturation en hall semi-ouvert et l'arrosage en extérieur, témoignent des concentrations atteintes sur certaines plates-formes (cf. Figure 4).

Les prélèvements à proximité d'un andain de compost en début de maturation ont été effectués avant et pendant les opérations destinées à retourner mécaniquement le compost. On note une augmentation significative des valeurs obtenues après retournement

FIGURE 2

Variations de température en fonction des phases du compostage

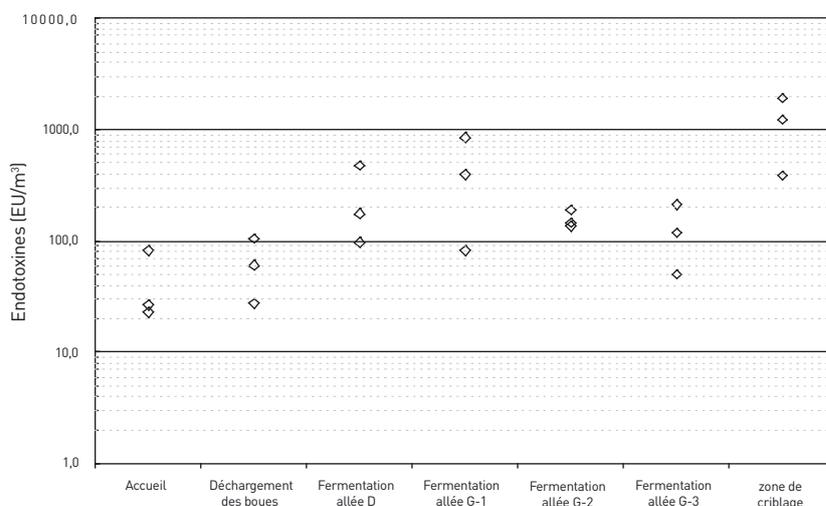


FIGURE 3

Influence de la saison sur la concentration en endotoxines et en bactéries thermophiles dans l'air de la plate-forme de déchets verts A

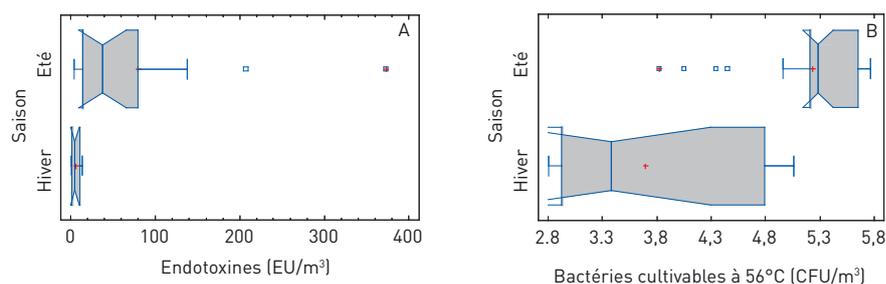


FIGURE 4

Variations de température en fonction des phases du compostage

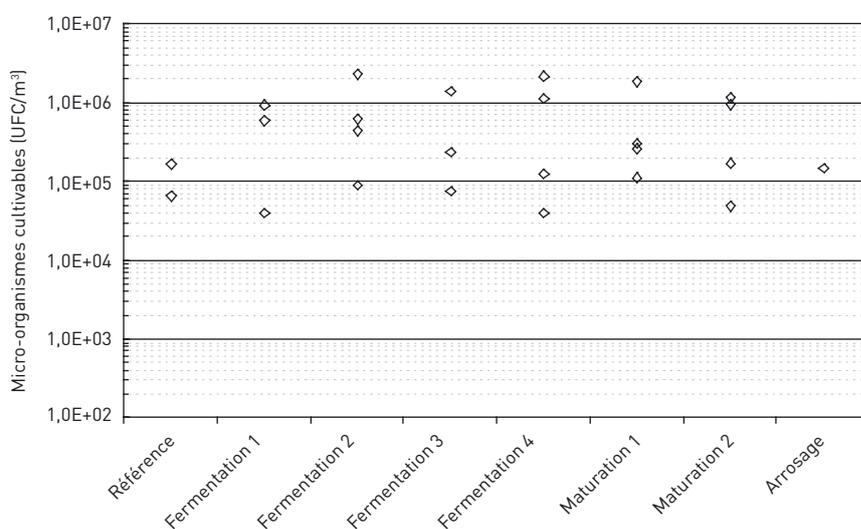


TABLEAU X

Concentrations en bactéries mésophiles et thermophiles

Entreprise	Déchet principal	Bactéries mésophiles à 25°C (UFC/m ³)							Bactéries thermophiles à 56°C (UFC/m ³)						
		n	Médiane	Min	Max	n > 10 ³	N > 10 ⁴	N > 10 ⁵	n	Médiane	Min	Max	n > 10 ³	N > 10 ⁴	N > 10 ⁵
A 1	DV	8	1,2E+04	3,1E+03	2,8E+04	8	4	0	8	3,0E+03	6,4E+02	1,2E+05	6	3	1
A 2	DV	16	2,0E+05	7,8E+03	5,6E+05	16	15	9	16	1,7E+05	8,5E+04	2,0E+07	16	16	14
B 1	boues	5	4,7E+03	1,2E+02	7,2E+03	4	0	0	4	5,8E+03	1,9E+02	1,7E+04	3	2	0
B2	boues	15	8,5E+04	3,7E+04	7,0E+05	15	15	7	15	1,2E+05	6,7E+03	4,3E+05	15	14	11
C	boues	16	2,1E+05	3,2E+03	6,6E+06	16	15	9	16	5,4E+05	5,3E+01	2,0E+06	15	15	15
D	bio-déchets	15	2,3E+05	3,3E+04	7,5E+05	15	15	10	5	2,1E+05	5,5E+04	6,2E+05	5	5	4
E	DV + boues	18	2,5E+05	2,6E+04	2,2E+06	18	18	16	18	2,5E+05	4,1E+04	1,4E+06	18	18	14
F	OMR	20	3,6E+04	0,0E+00	7,4E+05	19	13	4	20	8,0E+03	0,0E+00	4,6E+04	18	9	0
G	OMR	18	1,5E+04	1,1E+03	4,6E+05	18	13	5	17	3,3E+03	1,3E+03	3,9E+04	17	3	0
H	boues	18	1,3E+04	5,4E+02	1,2E+05	17	10	1	18	4,6E+03	5,1E+02	9,8E+04	14	8	0
I	DV	18	1,6E+04	1,2E+03	6,6E+05	18	12	2	17	6,6E+04	1,2E+04	8,2E+07	17	17	6
J	digestat OMR	18	1,8E+05	8,4E+02	5,1E+06	17	14	13	18	2,0E+05	4,3E+02	1,1E+07	16	14	12

TABLEAU XI

Concentrations en moisissures mésophiles et thermophiles

Entreprise	Déchet principal	Moisissures mésophiles à 25°C (UFC/m ³)							Moisissures thermophiles à 47°C (UFC/m ³)						
		n	Médiane	Min	Max	n > 10 ³	N > 10 ⁴	N > 10 ⁵	n	Médiane	Min	Max	n > 10 ³	N > 10 ⁴	N > 10 ⁵
A 1	DV	8	8,6E+03	3,1E+03	2,8E+04	8	3	0	8	2,4E+04	3,1E+03	1,9E+05	8	5	2
A 2	DV	16	7,9E+04	4,0E+03	1,6E+05	16	12	5	16	6,3E+04	1,6E+03	3,9E+05	16	12	5
B 1	boues	5	2,4E+03	5,4E+02	1,2E+04	3	1	0	4	5,8E+03	1,9E+02	1,7E+04	3	2	0
B2	boues	15	2,1E+04	1,2E+04	1,0E+05	15	15	0	15	2,1E+04	7,9E+03	3,4E+04	15	14	0
C	boues	16	2,4E+05	5,3E+02	5,0E+06	15	14	9	16	1,7E+03	5,3E+02	1,0E+06	11	3	3
D	bio-déchets	15	8,6E+03	2,0E+03	1,2E+05	15	5	1	15	2,3E+03	3,6E+02	3,4E+05	10	4	2
E	DV + boues	18	8,5E+03	1,1E+03	5,2E+04	18	8	0	17	3,2E+03	5,0E+02	1,6E+04	12	2	0
F	OMR	20	7,8E+03	0,0E+00	9,5E+05	19	9	3	6	1,2E+03	0,0E+00	2,7E+04	4	1	0
G	OMR	18	2,1E+04	5,4E+03	4,3E+05	18	14	3	14	2,0E+03	5,4E+02	4,2E+04	10	4	0
H	boues	18	3,4E+03	4,6E+02	3,1E+04	17	8	0	11	4,7E+03	3,6E+02	1,8E+05	9	5	3
I	DV	18	1,6E+04	5,1E+03	8,7E+04	18	14	0	18	2,8E+04	3,4E+03	3,4E+07	18	15	2
J	digestat OMR	18	3,7E+05	4,4E+02	4,8E+06	17	12	12	18	1,6E+05	4,3E+02	4,3E+06	13	12	12

pour les micro-organismes cultivables à 47°C et à 56°C (cf. *Tableau XIII*) alors que les valeurs de ceux cultivant à 25°C restent inchangées.

Les différences observées entre les concentrations en bactéries cultivables à 56°C en été et en hiver sur la plate-forme A lors d'activités similaires, n'ont pas permis de démontrer l'influence de la saison ($p > 0,05$). Il en va de même pour les bactéries cultivables à 25°C et les moisissures cultivables à 25°C et à 47°C.

TABLEAU XII

Influence du brassage d'un andain sur la mise en suspension des micro-organismes dans l'air de la plate-forme B

Micro-organisme recherché	Retournement de l'andain	Concentration moyenne [Log (UFC/m ³)]	P
Moisissures cultivables à 47°C	Avant	4	0,0171
	Pendant	5,1	
Moisissures cultivables à 25°C	Avant	4,2	0,5506
	Pendant	4	
Bactéries cultivables à 56°C	Avant	3	0,0016
	Pendant	4,9	
Bactéries cultivables à 25°C	Avant	4,2	0,7849
	Pendant	4,1	

DISCUSSION

EXPOSITION AUX AGENTS CHIMIQUES

Cette étude a mis en évidence la présence de deux polluants chimiques principaux : les MPT et l'ammoniac. Le niveau d'empoussièrement sur les plates-formes est très variable. Il dépend de plusieurs paramètres dont l'activité des engins mécanisés et le degré de confinement du milieu de travail. Les concentrations moyennes les plus élevées se trouvent en effet dans deux usines confinées traitant des déchets différents transportés par chargeuses sur pneus. Cependant, le plus fort niveau d'empoussièrement a été mesuré en extérieur, pendant l'été, à proximité d'une opération de criblage d'un compost de boues. L'été favorise l'empoussièrement, ce que confirme la profession. Dans l'ensemble, les valeurs mesurées en MPT sont inférieures à la VME (10 mg/m³) et correspondent à celles de la littérature. Les échantillons de poussières prélevés ont fait systématiquement l'objet d'analyse des EMT de manière à identifier et à doser les éléments métalliques présents.

Compte tenu de la nature des produits entrants sur les plates-formes (notamment les déchets verts), une partie des poussières est constituée de bois dont la VME est de 1 mg/m³. En l'absence de méthode d'identification adaptée, cet aspect n'a pas été pris en compte dans cette étude, mais il doit d'ores et déjà l'être par les préventeurs.

L'ammoniac, présent sur l'ensemble des installations, se trouve principalement sur les plates-formes traitant des boues, avec des concentrations variables selon le degré de confinement des locaux. Elles atteignent plusieurs fois la VME en intérieur. Des concentrations similaires ont également été enregistrées en milieu fermé lors du compostage de digestat d'OMR. En milieu non clos, ces concentrations étaient inférieures à la VME quel que soit le type de déchets traités, les valeurs moyennes étant faibles sur les plates-formes traitant les déchets verts et les OMR.

Les mesures d'ammoniac effectuées dans les cabines d'engins évoluant en milieu pollué montrent que leurs systèmes de filtration sont souvent inefficaces ; les conducteurs sont donc parfois exposés. Dans la première des deux entreprises les plus polluées, ceux-ci

portaient des appareils de protection respiratoire (APR) dont l'efficacité n'a pas été mesurée. Dans la seconde, les conducteurs disposaient certes d'un APR, mais ils ne le portaient pas. On peut supposer que ces salariés, soumis à une exposition prolongée et répétée, ne sentaient plus l'odeur de l'ammoniac ainsi que le précise la fiche toxicologique FT16 de l'INRS : une tolérance apparaît si bien que les seuils olfactifs et irritants sont perçus à des concentrations plus élevées qu'initialement.

EXPOSITION AUX AGENTS BIOLOGIQUES

Les mesures prouvent que les activités de compostage sont susceptibles de générer des endotoxines, des bactéries et des moisissures dans l'air. Les concentrations mesurées au cours de cette étude atteignent des niveaux relativement importants. Pour les endotoxines, les concentrations culminantes sont de 1 375 à 27 500 fois plus élevées que celles que l'on pourrait mesurer dans un environnement peu contaminé comme l'air extérieur. Pour les bactéries thermophiles, ce facteur se situe entre 10 et 10 000. Les concentrations mesurées sont très variables en fonction de la plate-forme, de l'activité, de la saison et du moment de prélèvement. La manipulation des déchets et du compost, notamment en zones confinées et pendant l'été, engendre la plus grande quantité de bio-aérosols. Les préventeurs devront en tenir compte.

Les agents microbiens mesurés et leurs concentrations correspondent globalement aux données rapportées dans la littérature. En effet, l'exposition des salariés aux agents microbiens et à leurs composés lors des activités de compostage a fait l'objet de nombreuses études ces dernières décennies. Aussi le sujet est-il relativement bien documenté et quelques synthèses sont disponibles [16, 20]. Quel que soit l'agent considéré, les concentrations évoquées dans les différents rapports et articles publiés ont une étendue très importante. En ce qui concerne les endotoxines, les concentrations rapportées dans les publications sont généralement inférieures à 1 000 UE/m³ mais une proportion non négligeable des mesures d'exposition dépasse cette valeur. L'essentiel des concentrations en moisissures rapportées dans la littérature varie de quelques UFC à 10⁷ UFC/m³ et les valeurs peuvent atteindre 10⁹ UFC/m³. Les

moisissures thermophiles identifiées appartiennent essentiellement aux genres *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium* et *Rhizopus*. Pour les bactéries, les actinomycètes sont présents dans l'air des plates-formes de compostage à des niveaux allant de quelques UFC à 10⁷ UFC/m³.

À défaut de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) aux bio-aérosols reconnues à l'échelle internationale, l'évaluation des risques liés à leur exposition est d'avantage qualitative que quantitative. Pour les endotoxines, une VLEP de 50 EU/m³ a bien été proposée dès 1998 aux Pays-Bas [21]. Mais le ministère néerlandais des affaires sociales l'a remontée à 200 UE/m³ en 2001. Cette valeur de référence [22, 23] a finalement été abandonnée. L'inhalation d'endotoxines peut provoquer des troubles gastro-intestinaux, des maux de tête, de la fatigue et des troubles respiratoires [16, 24, 25]. Une exposition aiguë et massive à des endotoxines et des poussières organiques est mise en cause dans la genèse du syndrome toxique des poussières organiques ODTs. Une exposition durable aux endotoxines peut dégrader la fonction respiratoire et conduire à la bronchite chronique et ses complications. Les risques liés à l'inhalation des moisissures aéroportées sont principalement de type infectieux, toxinique et immuno-allergique. Les mycoses pulmonaires (infection du poumon par une moisissure) comme les aspergilloses invasives sont exceptionnelles chez les personnes dont les défenses immunitaires sont amoindries par une maladie ou un traitement de type anti-rejet chez un greffé, anti-cancer ou corticoïde au long cours [26]. Les moisissures peuvent aussi être responsables d'effets immuno-allergiques, d'atteintes pulmonaires de types pneumopathies d'hypersensibilité, rhinites, conjonctivite et asthme [27, 28, 29] en particulier en présence des genres *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Alternaria* et *Penicillium*. La toxicité des moisissures résulte à la fois des composés entrant dans la composition de la paroi cellulaire comme les (1,3) β -D-glucanes, et des métabolites secondaires comme les antibiotiques et les mycotoxines [30]. La nocivité des actinomycètes est essentiellement de nature allergique entraînant des symptômes similaires à ceux décrits pour les effets immunoallergiques des moisissures.

Nos mesures de bio-aérosols ayant été réalisées en ambiance, elles ne peu-

vent présumer de l'exposition individuelle. Toutefois, en se fondant sur les données bibliographiques, il est possible d'estimer que les concentrations mesurées à l'occasion de notre campagne représentent un risque accru de nature allergique et toxinique pour les salariés non protégés [20].

CONCLUSION

La présence d'agents chimiques et biologiques est avérée, mais les concentrations sont très variables selon les plates-formes. Une estimation *a priori* des principaux polluants mis en évidence (ammoniac, MPT et endotoxines) en fonction de paramètres intégrés (saison, produits entrants...) est incertaine et seules des campagnes de mesure permettent d'évaluer avec précision les niveaux de pollution sur un site donné.

Toutefois, la variabilité des données mesurées et l'exposition individuelle probablement plus faible que celle mesurée en ambiance ne doivent occulter ni les sources de la pollution (déplacements d'engins, retournement d'andains, etc.), ni limiter la mise œuvre de mesures préventives adaptées. Celles-ci s'appuieront sur des dispositifs :

■ limitant le niveau de pollution générale en renforçant la ventilation des zones particulièrement polluantes sur la base de résultats de simulations numériques,

■ permettant de réduire la pollution particulaire, et probablement une partie des bio-aérosols, en atténuant l'émission à la source au niveau des engins mobiles,

■ ayant recours à des média filtrants dont les performances sont adaptées à la pollution particulaire présente (au niveau des cabines des engins mobiles),

■ intégrant l'utilisation de supports adsorbants pour l'ammoniac (caisson de protection sur les engins mobiles,

cartouches d'équipement de protection individuelles...),

■ permettant de confiner plus ou moins les andains dans les halls de fermentation. Des dispositifs de ce type avaient été installés sur deux plates-formes de boues, mais ils ont été abandonnés parce que peu fiables et peu pratiques. Améliorés et dotés d'une aspiration à la source, ils devraient néanmoins permettre de réduire les concentrations en ammoniac.

Les quatre premières problématiques sont déjà intégrées dans plusieurs travaux actuellement menés par l'INRS. La transposition sur le terrain des résultats permettra de rédiger des préconisations et de proposer des moyens de protection adaptés.

Reçu le : 30/09/2010

Accepté le : 14/10/2010

POINTS À RETENIR

- Le niveau d'empoussièrement sur les plates-formes de compostage est très variable et dépend de nombreux paramètres.
- Les concentrations en ammoniac sont élevées lors du compostage de boues, surtout en milieu fermé.
- Des endotoxines peuvent être présentes en concentrations non négligeables dans l'air des plates-formes.
- Les concentrations en micro-organismes cultivables sont très variables selon les plates-formes.
- Les média filtrants, notamment pour l'ammoniac, au niveau des cabines d'engins mobiles sont souvent inopérants.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ADEME. Site internet – <http://www.ademe.fr>
- [2] FNADE. – Le compostage. *Fiches thématiques*, 2003.
- [3] (ENSP/FNADE/MEDD) – *Les risques non microbiologiques associés au compostage des déchets*. Rapport d'étude, 2002.
- [4] NOEL L., CARRE J., LEGEAS M. – *Éléments pour la prise en compte des effets des unités de compostage de déchets sur la santé des populations riveraines*. Rapport d'étude FNADE – MEDD – ENSP, 2002.
- [5] LAVOIE J., MARCHAND G. – Détermination des caractéristiques à considérer d'un point de vue de santé et sécurité des travailleurs dans les centres de compostage des déchets domestiques. In : *Études et recherches*, Rapport IRSST, 1997. R-159.
- [6] KOMILIS D.P., HAM R. K., PARK J.K. – Emission of volatile organic compound during composting of municipal solid wastes. *Water Research*, 2004, 38, pp. 1707-1714.
- [7] TOLVANEN O., NYKANEN J., NIVUKOSKI U., HIMANEN., VEIJANEN A., HANNINEN K. – Occupational hygiene in a finnish drum composting plant. *Waste Management*, 2005, 25, pp. 427- 433.
- [8] LAVOIE J., ALIE R. – Determining the characteristing to be considered from a worker heath and safety standpoint in household waste sorting and composting plants. *Ann Agric Environ Med*, 1997, 4, pp. 123-128.
- [9] MAYS P. – Emissions de COV par les unités de compostage de déchets ménagers. *Environnement et Techniques*, 2000, 196, pp. 30-33.
- [10] NEDEY F. – L'évolution des procédés de compostage de déchets organiques. *Décision Environnement*, 1999, 80, pp. 60-65.
- [11] NEDEY F. – Compostage : 5 plates-formes à la loupe. *Décision Environnement*, 2000, 89, pp. 47-51.
- [12] PEIGNE J., GIRARDIN P. – Compostage et environnement. *Alter Agri*, 2001, 49, pp. 6-9.
- [13] EITZER B.D., Emissions of volatile organic chemical from municipal solid waste composting facilities. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29, pp. 96-902.
- [14] SMET E., LANGENHOVE H.V., BO I.D. – The emission of volatiles compounds during the aerobic and the combined anaerobic/aerobic composting bio-waste. *Atmospheric Environnement*, 1999, 33, pp. 1295-1303.
- [15] ATMO POITOU-CHARENTES – *Etude de l'impact de l'activité du site de compostage de Fontenet (17) sur l'air ambiant*. Rapport d'étude, 2004.
- [16] CAREPS – Etude bibliographique sur l'évaluation des risques liés aux bioaérosols générés par le compostage des déchets. ADEME, Editor. 2002, pp.1-216.
- [17] INRS. 2008. Fiche MétroPol 013/ Vo1 : Ammoniac et sels d'ammonium. Recueil – MétroPol : <http://www.inrs.fr>
- [18] INRS. 2004. Fiche MétroPol 014 : Hydrogène sulfuré. Recueil – MétroPol : <http://www.inrs.fr>
- [19] INRS. 2010. Fiche MétroPol 089/ Vo2 : Endotoxines. Recueil – MétroPol : <http://www.inrs.fr>
- [20] SCHLOSSER O., HUYARD A. – Les bio-aérosols en plate-forme de compostage : exposition et risque professionnel. *Environnement Risques et Santé*, 2008, 7, pp 37-45.
- [21] HEEDERIK D. and DOUWES J. – *Towards an occupational exposure limit for endotoxins?* 1997, 4, pp. 17-19.
- [22] THORN J., BEIJER L., JONSSON T. and RYLANDER R. – Measurement strategies for the determination of airborne bacterial endotoxin in sewage treatment plants. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2002, 46, pp. 549-554.
- [23] DOUWES J., THORNE P., PEARCE N. and HEEDERIK D. – Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2003, 47, pp. 187-200.
- [24] RYLANDER R. – Endotoxin in the environment – exposure and effects. *Journal of Endotoxin Research*, 2002, 8, pp. 241-52.
- [25] THORN J. AND KEREKES E. – Health effects among employees in sewage treatment plants: A literature survey. *American Journal of Industrial Medicine*, 2001, 40, pp.170-179.
- [26] LATGE J. P. – The pathobiology of *Aspergillus fumigatus*. *Trends in Microbiology*, 2001, 9(8), pp. 382-389.
- [27] BURGE H. A. – Airborne allergenic fungi: classification, nomenclature, and distribution. *Immunology and allergy clinics of North America*, 1989, 9(2), pp. 307-319.
- [28] HORNER W. E., HELBLING A., SALVAGGIO J. E. and LEHRER S. B. – Fungal allergens. *Clinical Microbiology Reviews*, 1995, 8(2), pp. 161-79.
- [29] FUNG F. and HUGHSON W. G. – “Health effects of indoor fungal bioaerosol exposure.” *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 2003, 18(7), pp. 535-544.
- [30] FISCHER G., MULLER T., OSTROWSKI R. and DOTT W. – Mycotoxins of *Aspergillus fumigatus* in pure culture and in native bioaerosols from compost facilities. *Chemosphere*, 1999, 38(8), pp. 1745-55.