

Étude de cas

CARACTÉRISATION DES NIVEAUX DE CONCENTRATION ET D'EXPOSITION AUX AGENTS BIOLOGIQUES ET CHIMIQUES DANS LES UNITÉS DE MÉTHANISATION-COMPOSTAGE

Retour d'expérience et préconisations de prévention

PATRICIA
BATTAIS,
SULLIVAN
LECHÊNE
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

FRÉDÉRIC
CLERC
INRS,
département
Métrologie
des polluants

→ **LA PROBLÉMATIQUE:** La méthanisation, procédé biologique anaérobie souvent complété par une étape de compostage, permet la décomposition de déchets organiques par des microorganismes. Ce procédé de traitement des déchets se développe depuis de nombreuses années en France car il permet la production de matière organique (digestat) et de biogaz valorisables (Cf. *Lexique*). Cependant, les salariés de ce secteur sont potentiellement exposés à des agents biologiques et chimiques, produits au cours du procédé et dangereux pour leur santé. Les niveaux de concentration et d'exposition à ces polluants sont peu documentés.

→ LA RÉPONSE DE L'INRS

L'INRS a engagé une étude afin de réaliser des mesures sur plusieurs sites de méthanisation-compostage, mesures d'ambiance dans les différents locaux professionnels et mesures individuelles sur les opérateurs.

Les mesures réalisées ont montré des expositions non négligeables aux polluants biologiques et chimiques et ont permis d'identifier les étapes des procédés de méthanisation et de compostage les plus émissives. Elles ont ainsi permis d'orienter les préconisations de prévention, notamment vers la réduction des émissions à la source par l'amélioration des pratiques de travail et des systèmes de prévention existants (captage à la source, venti-

LEXIQUE

Biogaz : Gaz produit à partir de matières organiques renouvelables et composé essentiellement de méthane (50 % à 70 %) et de dioxyde de carbone (30 % à 50 %).

Digestat : Résidu solide ou liquide récupéré après la méthanisation.

Digesteur : Réacteur biologique dans lequel ont lieu les réactions de transformation de la biomasse et la production du biogaz.

Intrants : Matières premières utilisées pour la méthanisation. Il peut s'agir de déchets agricoles (fumier, lisier, etc.), de déchets de l'industrie agroalimentaire (fruits, légumes, etc.), de déchets urbains (déchets verts, biodéchets ménagers ou issus de la restauration collective, etc.) ou encore de déchets industriels (eaux de lavage, boues industrielles, etc.).

lation générale), ainsi que vers la sensibilisation des opérateurs aux risques liés à la gestion des déchets.

Protocole et stratégie de mesure

Les campagnes de mesure ont été réalisées dans six unités de méthanisation-compostage d'ordures ménagères en France (sites A à F), sélectionnées en



© Gaël Kerbaol / INRS / 2022

fonction de la variété des procédés et méthodes utilisés (Cf. Tableau 1). Les mesures ont été effectuées sur des sites situés en zone non touristique ou à des périodes hors saison estivale, de sorte que les tonnages et la composition des déchets manipulés étaient habituels. Ce type de site emploie en général entre 20 et 30 salariés. Les conditions d'activité étaient typiques pour ce secteur, c'est-à-dire hors période de maintenance inhabituelle, avec quelques possibles arrêts techniques usuels dans ce

type d'usine. Sur l'un des sites (D), deux campagnes de mesures (D1 et D2) ont été réalisées à deux périodes différentes, pour juger de l'effet de la saisonnalité notamment.

Les sites de méthanisation-compostage utilisent des procédés différents (Cf. Tableau 1) [1]. Les technologies disponibles utilisent en général le traitement par voie sèche, et peuvent être classées en trois grands modes opérationnels : les réacteurs verticaux avec recirculation de digestat ou de

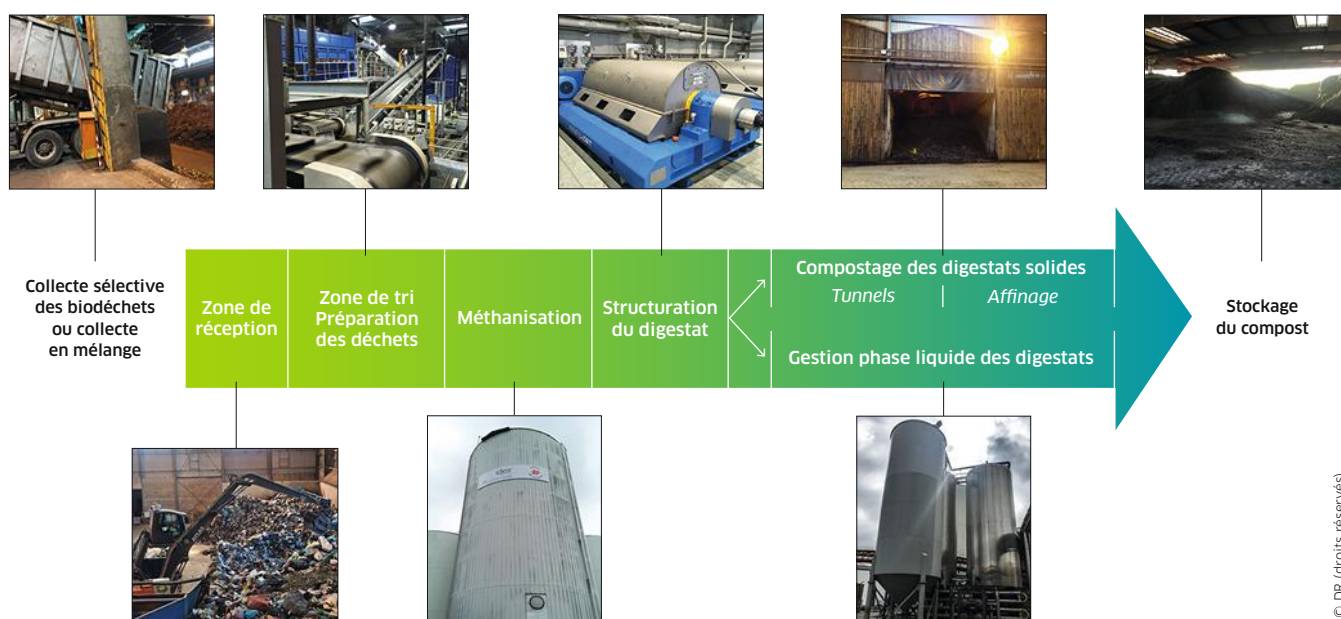
↓ **TABLEAU 1**
Résumé des caractéristiques principales des sites de méthanisation-compostage étudiés et conditions climatiques relevées durant les campagnes de mesures réalisées entre 2016 et 2018.

SITE	TYPE DE DÉCHETS	PROCÉDÉ	PÉRIODE DE PRÉLÈVEMENT	TEMPÉRATURE MOYENNE (°C)*	HYGROMÉTRIE MOYENNE (%)*
A	70 000 t DMA ¹ 30 000 t de biodéchets variés	Valorga	Octobre	18 °C	74 %
B	30 000 t DMA ¹ 6 000 t de biodéchets variés	BAL-Hybrid	Mars	16 °C	75 %
C	70 000 t de DMA ¹	Dranco	Mai	25 °C	59 %
D	30 000 t de biodéchets domestiques 5 000 t de biodéchets variés 10 000 t de DV ²	Kompogas	Décembre (D1)	8 °C	78 %
			Septembre (D2)	19 °C	87 %
E	20 000 t de FFOM ³ 20 000 t de DV ² 4 000 t de biodéchets variés	Linde-BRV	Avril	15 °C	72 %
F	85 000 t de DMA ¹	Valorga	Novembre	21 °C	70 %

1. DMA : déchets ménagers et assimilés. 2. DV : déchets verts. 3. FFOM : fraction fermentescible des ordures ménagères.

* Relevées dans l'air ambiant sur site durant les campagnes de mesures.





↑ FIGURE 1
Étapes de
traitement des
déchets dans
les unités de
méthanisation-
compostage.

biogaz (procédés Dranco et Valorga, respectivement), les réacteurs horizontaux (procédés Linde-BRV et Kompogas) et les réacteurs discontinus dits « type batch » avec percolation (procédé BAL-Hybrid).

En fonction du type d'intrant et du type de procédé, les sites de méthanisation présentent différentes zones de traitement. Cependant, certaines zones sont redondantes sur les différents sites et les activités ont lieu au niveau de cinq zones principales (Cf. Figure 1) :

- la zone réception avec les quais de déchargement des déchets entrants ;
 - la zone de tri-préparation où les déchets sont triés et traités afin de sélectionner la fraction organique la plus fine possible (généralement inférieure à 10 mm) à introduire dans le digesteur ;
 - la zone de « structuration du digestat » ou « structuration-déshydratation » située après l'étape de méthanisation, où les déchets sont déshydratés par centrifugation ou presse, et où le digestat produit (déshydraté ou brut) est mélangé avec du structurant (déchets verts, déchets frais, etc.). Les déchets verts sont ainsi souvent broyés au niveau de cette zone ;
 - les tunnels de compostage (fermés et étanches, avec ventilation par soufflage ou aspiration) où les digestats « solides » sont compostés ;
 - la zone d'affinage ou de criblage du compost (en local fermé ou en zone semi-ouverte) permettant d'obtenir un produit fini commercialisable.
- Les polluants connus pour être potentiellement présents dans l'air des usines de méthanisation-compostage sont à la fois d'origine biologique (bactéries, moisissures, endotoxines notamment) ou chimique

(ammoniac, sulfure d'hydrogène, composés organiques volatils, protoxyde d'azote, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, méthane, métaux variés suivant la composition des intrants). On retrouve également les poussières [2]. Ces composés font l'objet pour certains de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP-8h et VLCT-15 min) ou de valeurs guides (pour les agents biologiques) afin d'évaluer l'exposition potentielle des opérateurs de ce secteur (Cf. Tableau 2).

Les polluants précités ont différentes sources potentielles sur les sites de méthanisation-compostage :

- les agents biologiques sont associés aux déchets entrants, aux procédés mis en œuvre, ainsi qu'à l'environnement ambiant ;
- l'ammoniac (NH_3) est produit suite à la biodégradation de la matière organique (ammonification), son émission se produit donc généralement après méthanisation (zones de structuration-déshydratation et compostage) ;
- les composés organiques volatils (COV) sont en général issus des déchets et de leur fermentation. Les principaux retrouvés sont des terpènes, des cétones et des alcools ;
- le protoxyde d'azote (N_2O) est généralement produit en zone compostage, lors des processus de nitrification / dénitrification ;
- le monoxyde de carbone (CO) peut être présent du fait du moteur thermique des engins utilisés sur les sites (chargeuses, pelles, etc.), ou de la fermentation des déchets ;
- le dioxyde de carbone (CO_2) est émis également du fait de l'utilisation de moteurs thermiques dans les locaux, et lors de la transformation du carbone des déchets en CO_2 au cours des processus de dégradation ;

POLLUANT	VLEP-8H	VLCT-15 MIN	VALEURS GUIDES	FICHE TOXICOLOGIQUE OU NOTE ASSOCIÉE
Bactéries	–	–	10 ⁵ UFC/m ³ 10 ⁶ UFC/m ³	HST : NT 109 [3]
Moisissures	–	–	10 ⁵ UFC/m ³ 10 ⁶ UFC/m ³	HST : NT 109 [3]
Endotoxines	–	–	200 UE/m ³ 1 000 UE/m ³	HST : NT 25 [4]
Poussières (MPT*)	4 mg/m ³ (FI) 0,9 mg/m ³ (FA)	–	–	–
NH ₃	10 ppm _v	20 ppm _v	–	INRS : FT 16 [5]
N ₂ O	–	–	–	INRS : FT 267 [6]
MEK**	200 ppm _v	300 ppm _v	–	INRS : FT 14 [7]
2-butanol	100 ppm _v	–	–	–
CO	20 ppm _v	100 ppm _v	–	INRS : FT 47 [8]
CO ₂	5000 ppm _v	–	–	INRS : FT 238 [9]
H ₂ S	5 ppm _v	10 ppm _v	–	INRS : FT 32 [10]
CH ₄	–	–	–	–

*MPT : matières particulaires totales (FI : fraction inhalable ; FA : fraction alvéolaire). Pour les MPT, les valeurs indiquées ne sont pas des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) à proprement parler, mais des concentrations réglementaires moyennes à ne pas dépasser.

**MEK : butanone (méthyléthylcétone).

- le méthane (CH₄) est produit par le processus de méthanisation, et capté dans un but de valorisation énergétique, d'où sa présence potentielle sur les sites de méthanisation-compostage ;
- le sulfure d'hydrogène (H₂S) est émis lors de la fermentation en conditions anaérobies (sans oxygène O₂) de matière organique particulièrement riche en composés soufrés, les risques d'émission se situent au niveau du stockage d'intrants riches en soufre ou de digestat produit à partir de ces intrants, des canalisations permettant la circulation des jus de méthanisation, mais aussi au niveau des tas de compost s'ils ne sont pas suffisamment aérés ;
- les métaux peuvent être présents dans les déchets entrants, suivant les consignes de tri ou le contenu des déchets traités ;
- les poussières ou matières particulaires totales (MPT) sont principalement produites par les actions physiques ou mécaniques sur les déchets (manipulation en tri-préparation, retournement en compostage, broyage, criblage, nettoyage...).

Matériels et méthodes

Méthodes de mesure pour les composés biologiques et chimiques

Afin de mesurer ou de suivre l'ensemble de ces composés dans ce contexte de polyexposition, deux méthodes ont été déployées en parallèle : des prélèvements conventionnels sur filtre avec une analyse différée des échantillons au laboratoire et un suivi en temps réel avec des détecteurs adaptés. En fonction du polluant considéré, l'une ou l'autre des méthodes, ou les deux ont été utilisées. Dans le cas des prélèvements conventionnels, des

échantillons ont été collectés (en ambiance dans l'air des locaux de travail, en individuel sur les opérateurs à l'aide de harnais, au poste de conduite d'engins – chargeuse¹ – à l'intérieur de la cabine) en continu sur plusieurs heures, suivant le polluant et la méthode de prélèvement préconisée (base de données MétroPol²). Les prélèvements ont été réalisés en mode actif avec pompe (agents biologiques, poussières et métaux, NH₃ et COV/ambiance) ou en mode passif (N₂O et COV/individuel). Les analyses au laboratoire ont été réalisées suivant les méthodes développées et préconisées par l'INRS (MétroPol).

Le suivi en temps réel (ambiance, individuel, chargeuse) a été réalisé pour certains composés chimiques, soit pour compléter les prélèvements conventionnels, notamment par le repérage de pics d'exposition en fonction de l'activité (COV, NH₃, N₂O), soit du fait de la difficulté ou de l'impossibilité de prélever ces composés sur des supports de prélèvements (CH₄, CO, CO₂, H₂S). Les détecteurs en temps réel déployés ont été choisis en fonction de leurs caractéristiques (gamme de mesure, poids de l'appareil, portabilité, etc.), ce qui a conduit à assigner chaque modèle à une tâche spécifique :

- des détecteurs multigaz (pouvant mesurer COV, NH₃, CH₄, CO, CO₂, H₂S, N₂O suivant modèle et configuration) en mode actif (MultiRAE, RAE, France ; G200, Geotech, France) ont été principalement utilisés pour des mesures en ambiance, du fait de leur poids plus important que les autres qui les rend moins adaptés à être portés par les opérateurs ;
- d'autres détecteurs multigaz (pouvant mesurer NH₃, CH₄, H₂S suivant modèle et configuration) en mode

↑ **TABLEAU 2**
Résumé des principales valeurs limites d'exposition professionnelle ou valeurs guides en France pour les polluants chimiques et biologiques rencontrés dans l'air des sites de méthanisation-compostage.



MESURES	PRÉLÈVEMENTS CONVENTIONNELS						DÉTECTION EN TEMPS RÉEL		
	Ambiance	Individuel	Chargeuse	Conditions	Analyse	Métropol	Ambiance	Individuel	Chargeuse
Bactéries Moisissures	Pompe + cassette	Pompe + cassette	Pompe + cassette	2L/min -> 4h	Comptage	M-147	—	—	—
Endotoxines	Pompe + cassette	—	Pompe + cassette	2L/min -> 4h	Méthode LAL Spectrophotométrie	M-454	—	—	—
Poussières (MPT*)	Pompe + cassette	—	Pompe + cassette	2L/min -> 8h	Gravimétrie	M-274	—	—	—
NH ₃	Pompe + cassette	Pompe + cassette	Pompe + cassette	1L/min -> 8h ou 2L/min -> 4h	Chromatographie ionique	M-13	MultiRAE	QRAE3	Cairsens
Métaux	Pompe + cassette	—	Pompe + cassette	2L/min -> 8h	ICP-AES	M-125	—	—	—
N ₂ O	—	Tube zéolithe	—	Passif	GC-TCD	M-415	G200	—	—
COV	Pompe + tube	Badge Gabie	—	200mL/min -> 8h ou passif	GC-MS	M-338	MultiRAE	Cub	—
CO	—	—	—	—	—	—	MultiRAE	—	—
CO ₂	—	—	—	—	—	—	MultiRAE	—	—
H ₂ S	—	—	—	—	—	—	MultiRAE	QRAE3	—
LIE/CH ₄	—	—	—	—	—	—	MultiRAE	QRAE3	—
T (°C) / HR (%)	—	—	—	—	—	—	Testo 635	—	—

*MPT : matières particulaires totales.

↑ **TABLEAU 3**
Résumé des
méthodes de
mesure utilisées
pour les polluants
biologiques
et chimiques
mesurés sur les
différents sites de
méthanisation-
compostage.

actif (QRAE3, RAE, France ; BW GasAlertMicro5, BW Technologies Honeywell, France) et des détecteurs de COV en mode passif (Cub, ION Science, France) ont été utilisés pour les mesures individuelles, du fait que ce sont des appareils plus légers et portables. Les détecteurs Cub sont spécialement conçus pour les COV, mais sont sensibles à l'ammoniac ;

- des micro-capteurs d'ammoniac en mode passif (Cairsens, Envea, France) ont été utilisés pour les mesures en cabines d'engins (chargeuses). Leur gamme de mesure plus faible permet d'obtenir une meilleure précision et est adaptée aux cabines dans lesquelles les polluants sont présents à de faibles concentrations.

Les données de température et d'humidité ont été relevées sur chaque site à chaque point de mesure à l'aide de thermohygromètres (Testo 635, Testo, France). Dans le cas des échantillons biologiques, des points de référence ont été réalisés en extérieur, dans des zones supposées exemptes de pollution, et en intérieur (bureaux). L'ensemble des mesures réalisées est résumé dans le *Tableau 3*.

Méthode de mesure pour le taux de renouvellement d'air des locaux

Le taux de renouvellement, déterminé ici par traçage gazeux, est une valeur théorique correspondant au nombre de fois où le volume d'air d'un local est remplacé en une heure. La mesure par traçage gazeux consiste à ensemercer l'air du local avec un

gaz non présent dans l'environnement (hexafluorure de soufre SF₆) puis à enregistrer et exploiter la décroissance de sa concentration au cours du temps (analyseur de gaz SF₆, InfraRan, Wilks, États-Unis). En corrélant cette décroissance au volume du local (V), il est possible d'estimer un débit d'air global de renouvellement (Q_{air} = R.V) et de le comparer au débit créé par la seule ventilation mécanique. Ces données peuvent servir à pondérer des conclusions sur des niveaux de concentration ou d'exposition obtenus dans des conditions de renouvellement d'air inhabituelles (par exemple porte ouverte en période estivale). En première approximation, l'application d'une règle de proportionnalité permet d'ajuster les concentrations relevées en situation inhabituelle pour les rapporter à une situation de ventilation mécanique normale.

Analyses statistiques

Une « carte de chaleur » a été réalisée afin de représenter les niveaux ambiants de concentrations (prélèvements conventionnels sur filtre) en poussières, bactéries, moisissures, endotoxines et ammoniac et de mettre en évidence la potentielle polyexposition des opérateurs à ces substances.

Une « carte de chaleur » est obtenue en utilisant les données d'un tableau à trois entrées. Les colonnes représentent les substances mesurées pour chacune des étapes du procédé dans l'ordre du traitement de la matière organique. Les lignes représentent les différents sites d'intervention.

ZONE/SITE	A	B	C	D	E	F
Réception + préparation-tri	4,9	3,4	13	2,2	1,8	1,8
Structuration-déshydratation	7,1		–	2,1	–	4,9
Tunnels	–	3,2	2,3	3,3	1,9	2,4
Affinage	–		3	0,3	1,4	2

← TABLEAU 4
Taux de renouvellement d'air mesurés (vol/h).

Les valeurs dans chaque case indiquent le nombre de mesures de concentrations ambiantes effectuées et la couleur indique la plage de centiles dans laquelle se situe la moyenne géométrique des concentrations par rapport à toutes les concentrations mesurées.

- En rouge, la moyenne géométrique pour l'étape du procédé considéré est supérieure ou égale au 90^e centile de l'ensemble des mesures réalisées pour la substance ;
- En orange, la moyenne géométrique pour l'étape est comprise entre le 70^e et le 90^e centile de l'ensemble des mesures réalisées pour la substance ;
- En vert, la moyenne géométrique pour cette étape est strictement inférieure au 70^e centile de l'ensemble des mesures réalisées pour la substance.

Dans le cas des composés biologiques (endotoxines, bactéries, moisissures), environ 140 mesures ont été réalisées, toutes zones confondues. Dans le cas des autres composés illustrés par la carte (poussières, ammoniac), environ 220 mesures ont été effectuées. Les données statistiques (dénombrements, moyennes et écarts-types) ont également été calculées en fonction de l'étape du procédé considérée.

Résultats des mesures

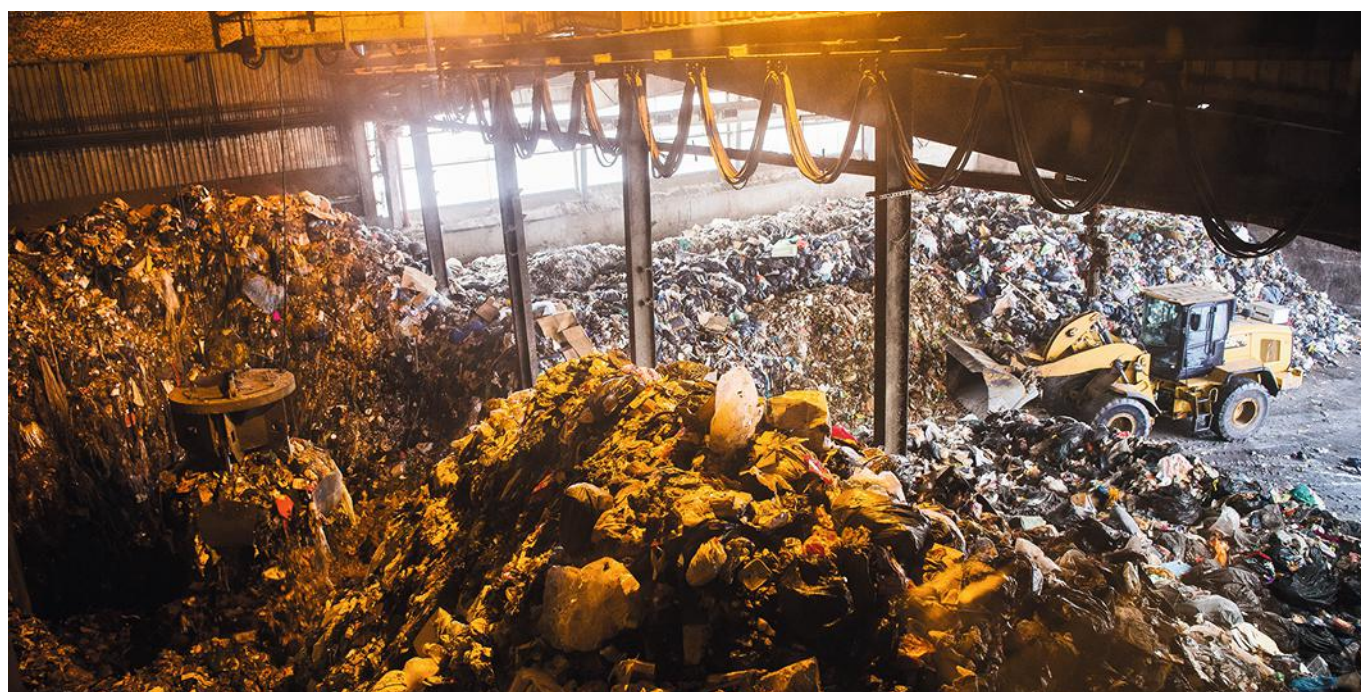
Mesures du taux de renouvellement d'air des locaux

Le *Tableau 4* présente les taux de renouvellement d'air mesurés sur les sites A à F. Dans l'ensemble, ces valeurs s'inscrivent dans l'ordre de grandeur attendu pour un site industriel, généralement compris entre deux et quatre renouvellements par heure.

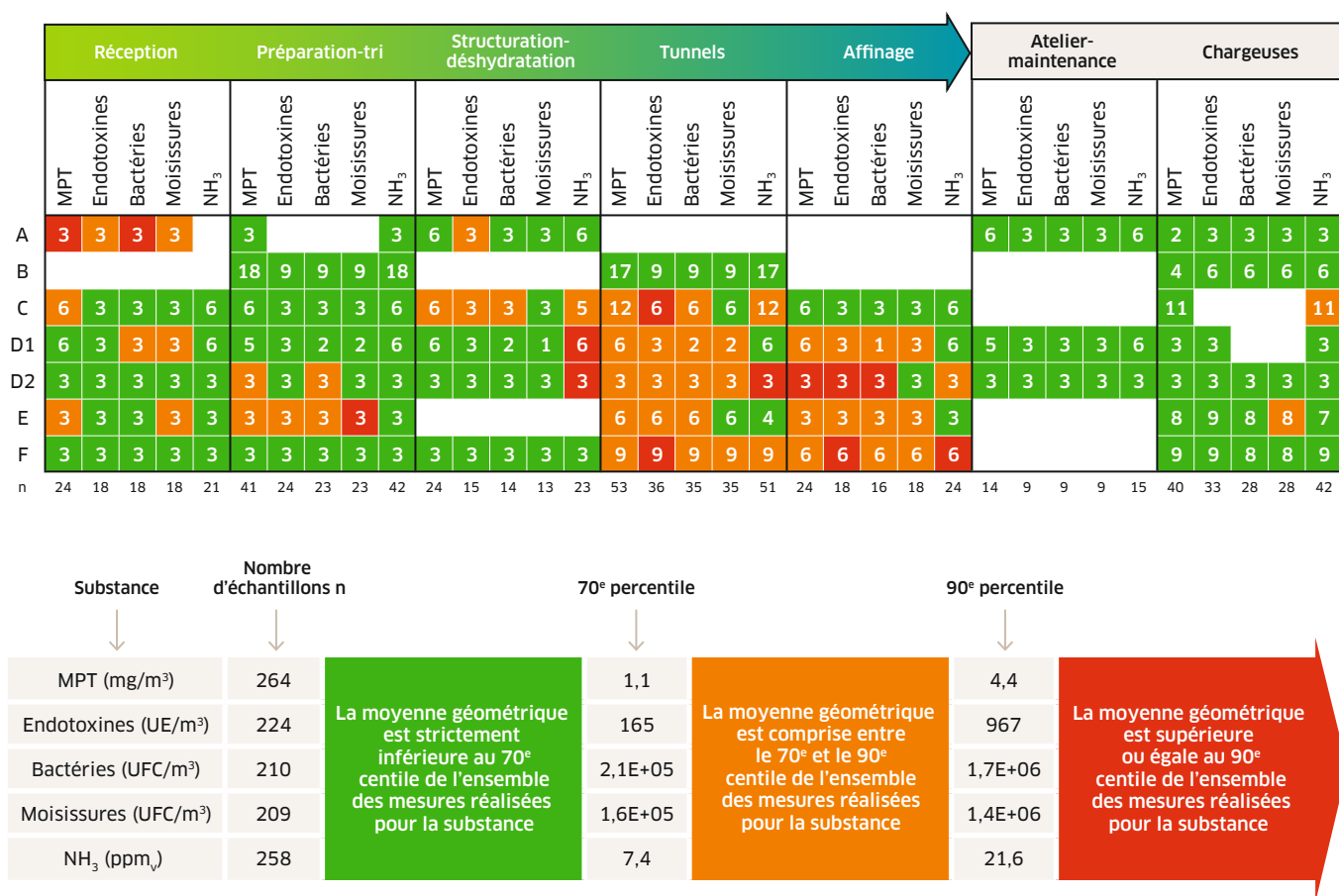
De fortes disparités apparaissent toutefois suite à des conditions inhabituelles de fonctionnement. Pour la zone de préparation-tri du site C, le taux élevé s'explique par l'ouverture des locaux lors de la mesure. Cette configuration, bien qu'inhabituelle, reflète les conditions réelles de travail lors de la campagne de mesures, marquée par un épisode de canicule. La valeur quasi nulle mesurée pour la zone d'affinage du site D résulte d'une panne du système de ventilation faute d'entretien préventif. Le renouvellement était alors exclusivement assuré par la ventilation naturelle au niveau des fuites du local.

Mesures (prélèvements conventionnels sur filtre) en ambiance pour les agents biologiques, les poussières et l'ammoniac

La « carte de chaleur » (*Cf. Figure 2*) permet de visualiser les niveaux de concentration pouvant



© Gaël Kerbaol / INRS / 2016



↑ FIGURE 2
« Carte de chaleur » des concentrations ambiantes en polluants chimiques et biologiques mesurées dans les différentes zones des sites de méthanisation-compostage lors des sept campagnes de mesures.

occasionner une polyexposition aux composés chimiques et biologiques dans les différentes zones des sites. Elle met notamment en évidence la présence des différents polluants en quantités significatives dans la partie compostage (tunnels et affinage) pour la plupart des entreprises. Elle permet également de repérer aisément les zones sur lesquelles une action induisant une diminution des niveaux de concentrations est nécessaire, comme par exemple la zone de réception de l'entreprise A ou la zone de préparation-tri de l'entreprise E pour lesquelles les poussières, endotoxines, bactéries et moisissures sont présentes en concentration plus importante que sur l'ensemble des sites investigués. Il est également possible de repérer les polluants pouvant représenter une problématique de prévention dans une entreprise donnée, comme par exemple les poussières et agents biologiques dans l'entreprise E pour la plupart des zones.

Les données statistiques complémentaires, toutes entreprises confondues, figurent dans le Tableau 5 [11]. À noter que la « carte de chaleur » avec son code couleur donne une indication statistique, mais ne place pas les concentrations mesurées par rapport à une limite d'exposition professionnelle.

En fonction des zones ou des étapes du procédé considérées, les polluants en présence et leur

quantité vont varier, en lien direct également avec les pratiques de chaque site.

Dans la partie de préparation-tri, les matières sont souvent peu émissives et les équipements de tri pourvus de systèmes de captage, ce qui explique des niveaux de concentration peu élevés. Pour autant, le site E présente des niveaux de concentration importants en polluants biologiques.

Dans la zone de structuration-déshydratation, les matières traitées sortent directement de méthanisation et sont donc très émissives, notamment en ammoniac. Sur les sites A et F, le transfert du digestat et les dispositifs de traitement sont clos avec captage des émissions, d'où les niveaux de concentration faibles observés pour l'ammoniac. À l'inverse, la conception et le fonctionnement déficients des systèmes de captage dans cette même zone sur le site D (avec notamment le non-replacement des capotages sur les convoyeurs après inspection ou maintenance) occasionne des niveaux de concentration très élevés (Cf. Figure 2).

Dans la partie dédiée à l'affinage, les matières manipulées sont généralement du compost affiné et des refus d'affinage en grandes quantités. Les polluants les plus problématiques à ce stade sont en général les agents biologiques, ce qui est constaté pour la plupart des sites. Pour autant, la matière peut encore émettre de fortes quantités d'ammoniac et

	MOYENNE GÉOMÉTRIQUE					ÉCART-TYPE GÉOMÉTRIQUE				
	MPT (mg/m ³)	Endotoxines (UE/m ³)	Bactéries (UFC/m ³)	Moississures (UFC/m ³)	NH ₃ (ppm _v)	MPT	Endotoxines	Bactéries	Moississures	NH ₃
Réception	1	62	1,2.10 ⁵	2.10 ⁵	1,9	3,1	4,2	6,6	4,2	2
Tri-préparation	0,4	10	1,1.10 ⁴	2,9.10 ⁴	0,7	2,8	7,5	18,1	10,8	2,5
Structuration digestat	0,3	71	1,3.10 ⁴	6,5.10 ³	9,8	5,6	5,9	7,3	9,2	3,3
Tunnels	0,9	225	2,1.10 ⁵	1,6.10 ⁵	7	5	9,8	10,9	5,6	2,7
Affinage	1,9	539	5,3.10 ⁵	2,7.10 ⁵	4,8	3,1	5,3	7,7	8,5	4,1
Atelier-maintenance	0,2	16	1,8.10 ⁴	1,1.10 ⁴	3,2	2,2	1,9	2,1	3,5	2,1
Chargeuses	0,2	14	3,2.10 ⁴	1,9.10 ⁴	1,9	3,2	5,4	8,5	13,1	5,8
Minimum	0,01	0,3	1,5.10 ²	1,5.10 ²	0,05					
Maximum	15,7	8515	2.10 ⁷	4,9.10 ⁶	54,1					

occasionner des niveaux de concentrations importants si les cycles de compostage sont courts et si les quantités de matières stockées sont importantes (site F). Sur le site D (campagne D2), un défaut de ventilation occasionnant un taux de renouvellement très faible pourrait expliquer l'augmentation importante des concentrations en polluants biologiques entre les campagnes de mesures D1 et D2 (Cf. Figure 2).

Mesures (prélèvements conventionnels sur filtre) individuelles pour l'ammoniac

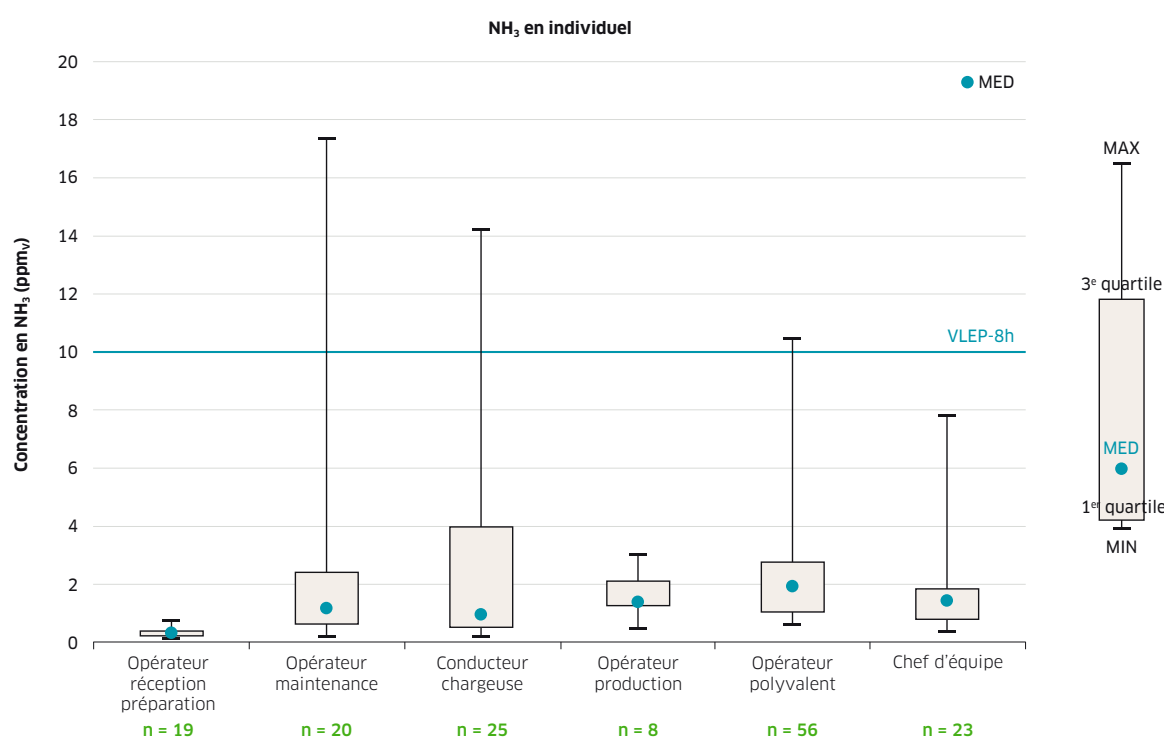
La Figure 3 montre les niveaux d'exposition individuelle en ammoniac qui ont été mesurés [12].

Dans les zones de réception, de préparation-tri et de structuration-déshydratation, les opérateurs interviennent régulièrement pour réaliser des vérifications, de la maintenance courante, ou pour gérer des dysfonctionnements. Les tunnels de compostage sont fréquentés par les conducteurs de chargeuses qui vidant et remplissent les tunnels, les opérateurs de maintenance lorsqu'une intervention est nécessaire, et les chefs d'équipe lors de leur ronde sur le site.

La Figure 3 met en évidence les éléments suivants :

- les valeurs mesurées en individuel pour les opérateurs évoluant dans les zones réception et préparation-tri sont très faibles (inférieures à 1 ppm_v) ;

↑ **TABLEAU 5**
Données statistiques toutes entreprises confondues pour chaque étape du procédé.



← **FIGURE 3**
Niveaux d'exposition individuelle en ammoniac, mesurés par prélèvement conventionnel sur filtre avec une analyse différée des échantillons au laboratoire, sur les opérateurs travaillant dans les six sites de méthanisation-compostage investigués.

- en ce qui concerne les opérateurs de la maintenance, les concentrations mesurées sont variables, en fonction des tâches réalisées et des zones fréquentées. Deux opérateurs de deux sites distincts ont été particulièrement exposés : un opérateur travaillant dans une zone de structuration-déshydratation très polluée en ammoniac (site D, campagne D1 ; Cf. Figure 2), et un autre opérateur intervenant dans une zone de tunnels de compostage (site C ; Cf. Figure 2). Plusieurs des valeurs mesurées ont dépassé la VLEP-8h pour ces deux opérateurs ;
- les conducteurs de chargeuses sont en général protégés par la filtration de leur cabine, à condition que les filtres soient correctement vérifiés et entretenus. Cependant, certains opérateurs ont occasionnellement des pratiques les conduisant à être exposés de manière significative à l'ammoniac et aux autres polluants présents. À titre d'exemple, une pratique courante consiste à stationner les chargeuses à l'intérieur des locaux pollués. Les opérateurs sont alors inutilement exposés lors de la montée ou de la descente du véhicule, alors qu'un stationnement à l'extérieur, ou à l'intérieur de locaux non pollués, permettrait d'éliminer cette exposition. Sur l'un des sites (site C ; Cf. Figure 2), les niveaux de concentration en ammoniac mesurés dans les chargeuses étaient élevés, trois valeurs dépassant la VLEP et une s'en approchant. Sur le site F, une concentration excédant la VLEP-8h a été mesurée : le conducteur portait un appareil de protection respiratoire (APR) lorsqu'il a quitté sa cabine pour intervenir en zone polluée ;
- les opérateurs de production évoluent dans toutes les zones du site. Ce poste était présent sur deux sites (A et F), et les concentrations mesurées étaient inférieures ou égales à 5 ppm_v soit 0,5 VLEP-8h ;

- les opérateurs polyvalents et les chefs d'équipe travaillent généralement sur l'ensemble du site. Comme dans les cas des opérateurs de maintenance, l'exposition globale durant le poste dépend des niveaux de pollution des zones de travail, et du temps passé dans chacune de ces zones. Sur le site D, une exposition importante à l'ammoniac a été relevée lors des deux campagnes de mesures menées (D1 et D2) : bien qu'une seule des valeurs mesurées ait excédé la VLEP-8h, de nombreuses concentrations mesurées étaient supérieures à 5 ppm_v soit 0,5 VLEP-8h pour ces deux postes.

Mesures (prélèvements conventionnels sur filtre pour les autres agents chimiques

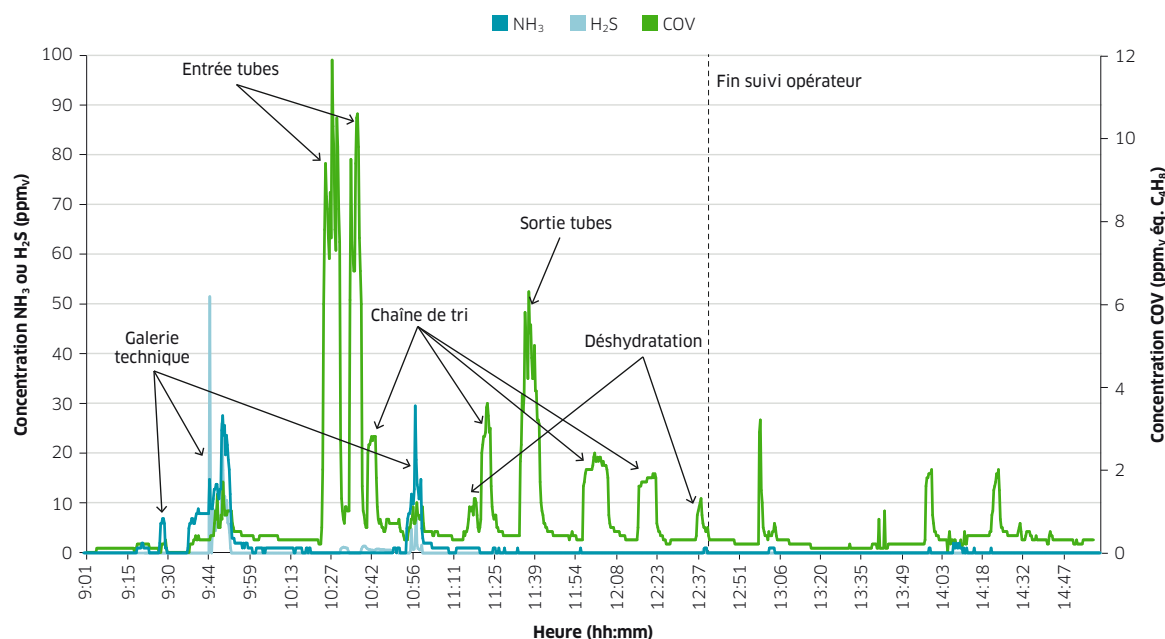
Outre les poussières (mesures en ambiance) et l'ammoniac (mesures en ambiance et en individuel) dont les résultats de mesures ont été présentés précédemment (Cf. Figures 2 et 3), d'autres composés chimiques ont été mesurés par prélèvements conventionnels : les COV (en ambiance et en individuel) avec un focus sur ceux attendus sur ce type de site, les métaux avec recherche des principaux (aluminium, cadmium, chrome, cuivre, manganèse, nickel, plomb, zinc) dans les poussières prélevées en ambiance, et N₂O en individuel (Cf. Tableau 3).

- Les COV sont présents en très faibles quantités, le plus souvent à des concentrations inférieures à 1 mg/m³. Les principaux COV détectés sur l'ensemble des sites sont le D-limonène (terpène), la MEK (méthyléthylcétone) et le 2-butanol (alcool). Ces composés ont été régulièrement mesurés à hauteur de quelques mg/m³, jusqu'à quelques dizaines pour le D-limonène notamment lors de l'arrivage de déchets verts. La MEK et le 2-butanol possèdent une VLEP-8h (Cf. Tableau 2).
- Les métaux sont présents également en très faibles quantités, de quelques dizaines voire centaines de

TABLEAU 6 →
Résumé des ordres de grandeur des concentrations mesurées en temps réel pour six composés gazeux, en ambiance et/ou en individuel sur les différents sites de méthanisation-compostage.

POLLUANT	SUIVI AMBIANCE	SUIVI INDIVIDUEL	ZONES INVESTIGUÉES	ÉTENDUE DES CONCENTRATIONS DÉTECTÉES	SITES
CH ₄	✓	✓	-	-	-
CO	✓	X	Zones avec engins Préparation-tri Compostage Préparation-tri	5-10 ppm _v 10-20 ppm _v 30-70 ppm _v → 200 ppm _v *	Tous F D (D2) B
CO ₂	✓	X	Toutes zones	500-1 000 ppm _v → 2500 ppm _v	Tous
COV	✓	X	Préparation-tri	5-15 ppm _v → 35 ppm _v	Tous
H ₂ S	✓	✓	Entrée tubes préfermentation Compostage (enlèvement) Galerie technique (plenums)	2 ppm _v 2-15 ppm _v 30-70 ppm _v	F F F
N ₂ O	✓	X	Déshydratation (presses)	~35 ppm _v	D (D1)

* Maximum affiché par le détecteur mais possibles interférents parmi les COV potentiellement présents.
→ : « jusqu'à ». ~ : « autour de ».



← FIGURE 4
Suivi en temps
réel d'un agent
de production
sur le site F pour
trois polluants :
l'ammoniac (NH₃),
le sulfure de
dihydrogène (H₂S)
et les composés
organiques
volatils (COV).

µg/m³ pour l'aluminium, quelques µg/m³ pour le chrome, le cuivre, le manganèse, le nickel et le zinc, à quelques dixièmes de µg/m³ pour le cadmium et le plomb. Toutes les valeurs mesurées étaient inférieures à 0,1 VLEP-8h voire 0,01 VLEP-8h lorsqu'elles existent.

- Aucune concentration en N₂O n'a été mesurée sur l'ensemble des sites par les tubes de charbon actif utilisés en individuel sur les opérateurs.

Suivi en temps réel pour différents composés chimiques

Le *Tableau 6* présente un résumé des résultats obtenus pour CH₄, CO, CO₂, les COV, H₂S et N₂O. Les résultats concernant la détection en temps réel de NH₃ ne figurent pas dans ce tableau, du fait de l'omniprésence de ce polluant sur les sites de méthanisation-compostage, en des quantités déjà présentées sur la *Figure 3*. Cependant les pics d'exposition détectés lors des différentes campagnes ont permis de formuler des recommandations de prévention auprès des opérateurs et des exploitants des différents sites.

- Malgré la production de biométhane, aucune concentration en méthane CH₄ n'a été détectée sur les sites, en ambiance comme en individuel.
- Le monoxyde de carbone CO a été mesuré de manière attendue à des teneurs de quelques ppm_v dans les zones où des engins évoluent. Pour les concentrations supérieures détectées (sites F, D, B), les résultats sont à prendre avec du recul car certains COV peuvent être des interférents du capteur de CO et le faire réagir, même en l'absence de CO.
- Le dioxyde de carbone CO₂ a été détecté à des concentrations moyennes de 500 à 1000 ppm_v

dans toutes les zones de tous les sites, avec un maximum de 2500 ppm_v.

- Les composés organiques volatils COV ont été principalement détectés en zone préparation-tri, probablement émis directement par les déchets triés, à des teneurs de 5 à 15 ppm_v en moyenne, avec un maximum à 35 ppm_v. À noter que l'ammoniac est un interférent des détecteurs à photo-ionisation (PID) utilisés pour la mesure des COV [13]; il est donc important de mettre en parallèle les profils de concentration en COV et en NH₃ pour l'interprétation. L'ammoniac étant à teneur quasi nulle en zone tri, la détection réalisée par le PID est imputable aux COV, ce qui n'est pas forcément le cas en zones déshydratation et compostage après méthanisation.
- Le sulfure d'hydrogène H₂S n'a été détecté que sur le site F au niveau de plusieurs zones : à l'entrée des tubes de préfermentation (tubes situés en amont de la partie préparation-tri et où les déchets subissent une première dégradation), au niveau de la zone compostage (pics de concentrations lors de l'enlèvement) et au niveau des plenums de la galerie technique (canalisations).
- Le protoxyde d'azote N₂O n'a été détecté qu'à une seule occasion, en zone déshydratation à hauteur d'environ 35 ppm_v sur le site D, sans confirmation possible par les tubes de zéolithe portés par les opérateurs.

Suivi en temps réel d'un opérateur et lien entre les pics d'exposition relevés et les activités/lieux

Afin d'illustrer la polyexposition de certains opérateurs à différents composés, tout en reliant les pics d'exposition observés à leurs activités ou aux



zones traversées, la *Figure 4* montre les profils de concentrations (NH₃, H₂S, COV) mesurées pour l'opérateur A du site F, agent de production, lors d'un jour de mesure.

L'opérateur A est un agent de production évoluant sur l'ensemble du site et pouvant être exposé à un certain nombre de polluants, dont les majoritaires pouvant être suivis en temps réel sont NH₃, H₂S et les COV. Durant la durée de son poste, il a pu être exposé aux COV (chaîne de séparation en préparation-tri ou au niveau des tubes de préfermentation en amont), ainsi qu'à NH₃ et H₂S lors de ses interventions en galerie technique sur les plenums (canalisations). Comme précédemment évoqué, les profils obtenus pour NH₃ et les COV doivent être placés en parallèle du fait des interférences possibles (l'absence de NH₃ lors des pics de COV permet de bien imputer la mesure donnée par le détecteur PID aux COV).

Synthèse et recommandations

Cette étude a permis de montrer une polyexposition des opérateurs à des agents biologiques et chimiques sur les sites de méthanisation-compostage, avec des expositions individuelles pouvant parfois dépasser la VLEP pour certains composés. À partir de l'ensemble des mesures et des observations faites sur les sites, des préconisations ciblées ont pu être réalisées, mais des préconisations générales ont également pu être dégagées :

- les systèmes de ventilation doivent être correctement conçus et entretenus (taux de renouvellement d'air suffisants, systèmes de captage localisés...), tous comme les différents dispositifs de gestion des déchets (convoyeurs couverts...) ;
- les moyens et systèmes de prévention doivent être suivis et contrôlés (maintenance des équipements tels que détecteurs en temps réel, caissons filtrants des chargeuses, appareils de protection respiratoire...) ;
- la maintenance et le nettoyage doivent être facilités (zones de plain-pied, systèmes de nettoyage correctement organisés...) ;
- les cycles de traitement des déchets doivent être suffisamment longs (notamment la partie compostage) afin de limiter les émissions résiduelles du produit fini, et les quantités de matière stockées dans les locaux doivent être limitées ;
- les différentes activités doivent être séparées afin d'éviter l'exposition des opérateurs par coactivité ;
- les opérateurs doivent être formés afin d'identifier les risques liés aux déchets et d'appliquer les consignes de sécurité lors de leur gestion. ●

1. Engin de chantier et de manutention motorisé, équipé d'un large godet à l'avant, conçu pour collecter, soulever, transporter et déverser des matériaux en vrac.

2. Voir : INRS – Base de données MétroPol. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol.html>

BIBLIOGRAPHIE

[1] DIRRENBARGER P. – Méthanisation (Partie 2) : Technologies de digestion et procédés utilisés – État de l'art. *Techniques, sciences, méthodes*, 2020, 9, pp. 33-56.

[2] DIRRENBARGER P. – Méthanisation (Partie 1) : Principe, paramètres et polluants émis – État de l'art. *Techniques, sciences, méthodes*, 2020, 9, pp. 15-30.

[3] DAVID C. ET AL. – Valeurs guides bactériennes et moisissures cultivables : interprétation des résultats de métrologie des bioaérosols. *Hygiène & sécurité du travail*, 2023, 271, NT 109, pp. 55-63. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%20109>

[4] BALTU I. ET AL. – Valeurs guides endotoxines : interprétation des résultats de métrologie des bioaérosols. *Hygiène & sécurité du travail*, 2015, 239, NT 25, pp. 46-50. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%2025>

[5] INRS – Fiche toxicologique n° 16 – Ammoniac et solutions aqueuses. 2021. Accessible sur : https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_16

[6] INRS – Fiche toxicologique n° 267 – Protoxyde d'azote. 2025. Accessible sur : https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_267

[7] INRS – Fiche toxicologique n° 14 – Butanone ou méthyléthylcétone. 2020. Accessible sur : https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_14

[8] INRS – Fiche toxicologique n° 47 – Monoxyde de carbone. 2021. Accessible sur : https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_47

[9] INRS – Fiche toxicologique n° 238 – Dioxyde de carbone. 2020. Accessible sur : https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_238

[10] INRS – Fiche toxicologique n° 32 – Sulfure d'hydrogène. 2024. Accessible sur : https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_32

[11] BATAIS P. ET AL. – Mesure des poussières, des microorganismes et de l'ammoniac dans l'air des unités de méthanisation-compostage : zones concernées par la polyexposition et corrélation entre les paramètres mesurés. In : Congrès français sur les aérosols, Paris, 2024.

[12] BATAIS P. ET AL. – Occupational exposure to ammonia during industrial-scale anaerobic digestion composting of household waste. *Detritus*, 2024, 27, pp. 27-36.

[13] DIRRENBARGER P. ET AL. – Évaluation de l'exposition à l'ammoniac : apport de la détection en temps réel. *Hygiène & sécurité du travail*, 2018, 252, NT 65, pp. 66-72. Accessible sur : www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%2065