



ENSP
ÉCOLE NATIONALE DE
LA SANTÉ PUBLIQUE
RENNES

Ingénieur du génie sanitaire

Formation 1999-2000

Dates du Jury : 25-26 Septembre 2000

**ETUDE DE FAISABILITE : APPLICATION DE
LA DEMARCHE HACCP AU COMPOSTAGE DES
BOUES DE STATION D'EPURATION**

Laurent GRIMAUULT

Ingénieur INSA

Lieu du stage :

ADEME, centre d'Angers

Accompagnant professionnel :

Isabelle DEPORTES

Référent pédagogique :

Michèle LEGEAS

REMERCIEMENTS

Au terme de ce stage je tiens à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble des personnes qui m'ont aidé et aiguillé au long de la réalisation de cette étude :

Je tiens à remercier Jean-Marc MERILLOT pour m'avoir accueilli au sein du service DAGAL.

J'adresse toute ma reconnaissance à Isabelle DEPORTES pour m'avoir proposé ce stage, ainsi que pour son aide et les connaissances qu'elle a su m'apporter tout au long de la rédaction du mémoire.

Je remercie également Michèle LEGEAS pour ses conseils.

Je veux saluer les employés et gérants des différentes plates-formes de compostage visitées qui m'ont accueillis avec patience et sympathie.

Enfin, je remercie l'ensemble du service DAB pour le chaleureux accueil et plus particulièrement les personnes qui ont participé à la bonne réalisation de ce stage.

ABSTRACT

As well as it stabilises organic matter, sewage sludge composting allows to destruct faecal pathogenic micro-organisms and prevent compost from recolonisation.

To perpetuate this treatment procedure, sanitary security can be guaranteed by implementing HACCP (Hazard Analysis – Critical Control Point) to composting process. This method used in Food-Stuff Industries assures food sanitary security thanks to process control at critical points level.

The aim of this plan is studying feasibility of HACCP application to sewage sludge composting process.

Once danger and factors that allows compost hygienization are known, we are able to suggest three Critical Control Point and means to implement during composting process in order to control hazard. Then, application of HACCP on composting allows us to draw up a list of technical, financial and human constraints and limits. Following the visit of five platform of composting, a list of pre required is suggested.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	2
ABSTRACT.....	3
SOMMAIRE DES TABLEAUX.....	6
SOMMAIRE DES FIGURES.....	6
1 - INTRODUCTION.....	1
2 - GÉNÉRALITÉS.....	4
2.1 RISQUE MICROBIOLOGIQUE ET COMPOSTAGE DES BOUES.....	4
2.1.1 Identification du danger.....	4
2.1.2 Voies d'expositions au danger.....	5
2.1.3 Probabilité d'expression du danger.....	6
2.1.4 Conclusion.....	7
2.2 LE COMPOSTAGE DES BOUES DE STEP.....	7
2.2.1 Principe du compostage [11,12,15,32,36,40].....	7
2.2.2 Capacité hygiénisante du compostage.....	10
2.2.2.1 Besoins et facteurs de croissances des microorganismes pathogènes d'origine fécale.....	10
2.2.2.2 Choix d'organismes indicateurs [16,23,26,40].....	13
2.2.3 Conclusion.....	14
2.3 LA DÉMARCHE HACCP.....	15
2.3.1 Présentation de la démarche [5].....	15
2.3.2 Application de l'HACCP [5,7,8,20,31,33].....	16
2.3.3 Critique de la démarche HACCP [1,2,4,14].....	17
2.3.4 Conclusion.....	18
3 - APPLICATION DE LA DÉMARCHE HACCP AU COMPOSTAGE DES BOUES DE STEP.....	19
3.1 LE PLAN DE TRAVAIL EN DOUZE POINT : GUIDE EN VUE DE LA MISE EN PLACE DE L'HACCP.....	19
3.1.1 Constitution de l'équipe HACCP [31, 33].....	19
3.1.2 Description du produit.....	20
3.1.3 Utilisation attendue du produit [6,15,19,35,37].....	23
3.1.4 Construction du diagramme de fabrication du produit.....	23
3.1.5 Confirmation du diagramme par la visite du site de compostage.....	24
3.1.6 Lister les dangers et les mesures préventives –étape par étape.....	24
3.1.7 Déterminer les CCP (Points Critiques pour la Maîtrise du Danger).....	27

3.1.8	<i>Etablir les limites critiques aux CCP</i>	29
3.1.9	<i>Etablir le système de surveillance des CCP</i>	29
3.1.10	<i>Etablir un plan d'actions correctives</i>	30
3.1.11	<i>Vérifier le système [31,33]</i>	35
3.1.12	<i>Etablir une documentation [31,33]</i>	35
3.1.13	<i>Conclusion</i>	36
3.2	APPLICABILITÉ DE L'HACCP SUR DIFFÉRENTS SITES DE COMPOSTAGE	38
3.2.1	<i>Description des plates-formes :</i>	38
3.2.1.1	Site de Saint-Aubin-des-Bois (28):	38
3.2.1.2	Site de Saint Rémy en Mauges (49):	40
3.2.1.3	Site de Fontenet (17) :	41
3.2.1.4	Site d'Ensues (13):	43
3.2.1.5	Site de Riscle (32):	44
3.2.1.6	Campagne d'échantillonnage :	45
3.2.2	<i>Bilan:</i>	45
4 -	DISCUSSION	48
4.1	FAISABILITÉ	48
4.2	INTÉRÊT D'APPLIQUER UNE TELLE DÉMARCHE	49
4.2.1	<i>HACCP et ISO 9000</i>	50
4.2.1.1	Les démarches d'assurance qualité	50
4.2.1.2	Le système ISO en tant que système d'assurance qualité :	50
4.2.1.3	Le système HACCP	51
4.2.1.4	L'association de l'HACCP et de l'ISO 9002	51
4.2.1.5	Conclusion	51
4.2.2	<i>HACCP et Homologation concernant les matières fertilisantes - supports de culture</i>	52
5 -	CONCLUSION	53
	BIBLIOGRAPHIE	55
	GLOSSAIRE ET ABRÉVIATIONS	58
	ANNEXE 1 : DÉTERMINATION DES POINTS CRITIQUES – ARBRE DE DÉCISION	59
	ANNEXE 2 : PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE – PLATE FORME DE RISCLE	60
	ANNEXE 3 : TEMPÉRATURE DE L'ANDAIN PRÉLEVÉ À SAINT-AUBIN-DES-BOIS	62
	ANNEXE 4 : SYSTÈME DOCUMENTAIRE PROPOSÉ [31]	63
	ANNEXE 5 : CAMPAGNE D'ÉCHANTILLONNAGE	65
	ANNEXE 6 : REVUE DÉTAILLÉE DE L'ISO 9002 ET DE L'HACCP [1,33]	67

SOMMAIRE DES TABLEAUX

Tableau 1 : liste de microorganismes d'origine fécale – N ₅₀ (La dose ingérée provoquant 50% d'infection dans une population exposée)et DMI (Dose Minimale Infectante) pour l'ingestion correspondante – Pathologies associées [15,17,29,34,40]	5
Tableau 2 : tableau représentant la liste des dangers au cours du compostage.	26
Tableau 3 : résultats des analyses microbiologiques effectuées sur du compost produit à Riscle	66
Tableau 4: résultats des analyses microbiologiques effectuées sur du compost produit à Saint-Aubin-des-Bois	66

SOMMAIRE DES FIGURES

Figure 1 : les principales voies d'exposition pour les pathogènes après épandage sur les terres. [37]	6
Figure 2 : les grandes étapes du compostage des boues, l'évolution de la température du substrat et la nature des microorganismes présents [28].....	8
Figure 3 : les effets hygiénisants du couple temps-température dans le cas du compostage des boues d'épuration [18]....	12
Figure 4 : schéma de la démarche HACCP	17
Figure 5 : schéma théorique du compostage	19
Figure 6 : localisation des CCP au cours du procédé de compostage.	29
Figure 7 : schéma d'application de l'HACCP au compostage des boues de STEP.....	37
Figure 8 : schéma du procédé de compostage du site de St-Aubin-des-Bois.	38
Figure 9 : schéma du procédé de compostage du site de St-Rémy-en-Mauges.	40
Figure 10 : schéma du procédé de compostage du site de Fontenet.....	41
Figure 11 : schéma du procédé de compostage du site d'Ensues.....	43
Figure 12 : schéma du procédé de compostage du site de Riscle.....	44

1 - INTRODUCTION

Depuis trente ans, des efforts considérables ont été effectués en matière d'assainissement. L'un des objectifs de la loi sur l'eau n°92-3 du 3 janvier 1992 est la reconquête de la qualité des milieux aquatiques. Cette loi impose aux collectivités d'améliorer le taux de collecte et de renforcer le traitement des eaux usées afin de limiter l'impact sur l'environnement des rejets issus du traitement. La quantité d'eaux usées traitées croît et les traitements sont de plus en plus performants. Ainsi, la quantité de boues produites augmente : la production actuelle est estimée à 850 000 tonnes de MS (Matière Sèche) par an et à l'horizon 2005, on prévoit une production annuelle de 1300 000 tonnes.

Les boues de STEP (STation d'ÉPuration) ont le caractère de déchet au sens de la loi du 15 juillet 1975 (Ar.2 Décret du 8 décembre 1997). La gestion des déchets dispose d'un cadre réglementaire depuis la loi n°75—633 du 15 juillet 1975 (renforcée par la loi n°92-646 du 13 juillet 1992) qui fixe les objectifs suivants :

- limiter la production et la nocivité des déchets ;
- valoriser les déchets par recyclage, par la diversité des voies de ré-emploi pour une utilisation optimisée des ressources ;
- accueillir dans les installations de stockage les seuls déchets ultimes : déchets qui ne sont plus susceptibles d'être traités.

Ainsi, à l'horizon 2002, l'élimination des boues de STEP reposera sur les voies suivantes : 1) la réutilisation sur les sols ou valorisation biologique (Actuellement 60% des destinations), 2) l'oxydation thermique (15% des destinations actuelles) et 3) l'envoi en centre d'enfouissement technique (actuellement 25% des destinations) en tant que solution ultime dans des proportions limitées et des conditions techniques à préciser.

Actuellement, la majorité des boues est valorisée en agriculture. Cette solution est souhaitable et justifiée car elle permet d'accomplir le cycle de la matière organique. D'autre part, les boues présentent des caractéristiques agronomiques intéressantes : elles représentent de part leur composition une source d'alimentation pour les cultures et permettent d'améliorer les caractéristiques du sol, surtout si les boues sont chaulées ou compostées.

Cependant, la présence d'autres éléments issus de l'activité humaine (Microorganismes pathogènes, Eléments-Traces Métalliques (ETM), Micro-Polluants Organiques (MPO)...) peut présenter un risque pour l'environnement ou la santé des populations humaines et animales. De plus cette voie de valorisation souffre d'une mauvaise image de marque :

- le caractère de déchet est à l'origine d'une réticence de certains acteurs de la filière ;
- les nombreuses crises sanitaires alimentaires sont autant de facteurs qui jouent en la défaveur de l'épandage de ce déchet en agriculture, le consommateur de denrées alimentaires étant très sensible aux risques (justifiés ou non) liés à ce type de pratique.

Les acteurs concernés par la valorisation des boues sont conscients que cette filière reste le meilleur compromis, car elle est la plus appropriée tant au niveau agronomique qu'environnemental. Cependant, ils souhaitent avoir des garanties quant à la qualité sanitaire du produit épandu et la responsabilité du producteur

de boues. Cette responsabilité devrait être engagée en cas de dégradation de la qualité du sol ou d'un problème d'ordre sanitaire tant à court qu'à long terme.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons à la maîtrise du risque sanitaire lié à la présence de microorganismes pathogènes d'origine fécale dans les boues de STEP. Ce type de risque sanitaire est complexe à évaluer (de nombreux microorganismes sont présents théoriquement dans les boues mais peu sont finalement dosés et un certain nombre de données essentielles ne sont pas connues : les Dose Minimales Infectantes (DMI), la survie des microorganismes dans le sol...). Une fois les dangers identifiés, différentes stratégies de maîtrise des risques sont possibles en limitant la présence d'agents dangereux ou l'exposition des populations.

La filière de valorisation des boues présente déjà des garanties quant à la gestion de ce type de risques :

1. Les produits composés de boues peuvent faire l'objet d'une homologation en tant que matière fertilisante et/ou support de culture auprès de la commission des matières fertilisantes (CMFSC) du Ministère de l'Agriculture (selon la loi matières fertilisantes du 13 juillet 1979 – n°78-595). Le produit fait, entre autres, l'objet d'un examen permettant de vérifier « son efficacité et son innocuité à l'égard de l'homme, des animaux et de leur environnement dans les conditions d'emploi prescrites ou normales », la composition du produit devant être constante. Le fabricant ou le responsable de la mise sur le marché doit mettre en place l'auto-contrôle et la surveillance en routine de l'ensemble de la fabrication. Dans la pratique, le recours à l'homologation est rare pour l'ensemble des supports de culture et matières fertilisantes. D'autant plus pour les composts de boues, car la France se trouvait dans une situation de blocage jusqu'en 1996 et les exigences de qualité microbiologique sont encore à l'heure actuelle particulièrement poussées et limitent ainsi l'applicabilité des propositions retenues [43].

2. En outre, la réglementation française (Décret du 29 décembre 1997 et Arrêté du 8 janvier 1998), propose, lorsque le produit ne fait pas l'objet d'une homologation, de valoriser la boue dans le cadre d'un plan d'épandage. Les restrictions d'usage et les limites fixées avant le retour au champ ou la mise en culture permettent d'éviter tout contact entre les micro-organismes pathogènes et l'homme ou les animaux. Cette dernière réglementation permet de limiter l'exposition des populations en maîtrisant les épandages.

Il est aussi possible d'agir sur le second facteur qui compose le risque : les agents dangereux. Ainsi, dans cette dernière réglementation apparaît la notion d'hygiénisation (qui permet la maîtrise du risque sanitaire grâce à la réduction de la contamination en germes pathogènes d'origine fécale et en évitant les recroissances ultérieures) en précisant les indicateurs microbiologiques à contrôler. Cependant, il n'est pas fait mention des moyens à mettre en œuvre en vue d'obtenir un produit hygiénisé.

D'autres réglementations au niveau européen (Cf. projet de directive européenne) et des USA (l'Environmental Protection Agency (EPA) avec les procédés dits PRSP et PFRP) proposent une liste de traitements des boues à appliquer en vue d'obtenir un produit hygiénisé. Cependant, aucun de ces textes ne précise comment la filière doit s'organiser pour respecter les paramètres fixés. Les moyens à mettre en œuvre afin de gérer la qualité de ces procédés ne sont pas décrits mais sont encouragés (Cf. Projet de directive européenne)

Le compostage des boues fait partie des traitements conseillés par ces textes. Il permet par la maîtrise de différents paramètres, la réduction de la charge en germes pathogènes et prévient la recolonisation des tas de compost. Cependant, aucun des textes ne précise les moyens à mettre en œuvre afin de maîtriser le procédé.

Dans d'autres secteurs, des outils de maîtrise des procédés pour les questions d'ordre sanitaire existent. En agro-alimentaire, la sécurité sanitaire des denrées peut être assurée grâce à l'application de la démarche HACCP (Hazard Analysis – Critical Control Point). C'est une démarche qui comme son nom l'indique permet de maîtriser les risques en agissant sur certains paramètres au niveau de points critiques pendant le procédé de fabrication. Cette démarche est utilisée réglementairement pour assurer l'hygiène des denrées alimentaires : les arrêtés français transposant la directive européenne (93/43/CEE du 14 juin 1993) précisent qu'un auto-contrôle doit être réalisé par l'exploitant pour s'assurer de la conformité sanitaire des produits fabriqués ou de son installation. Le but de ces arrêtés est d'utiliser les principes de l'HACCP pour acquérir plus de sécurité.

L'HACCP est un système d'assurance de la sécurité sanitaire. L'application de cette méthode permet d'aboutir à une stratégie d'intervention et de déduire les moyens à mettre en œuvre au cours d'un procédé de transformation de matières premières en un produit ne présentant pas de risque sanitaire. Ainsi, l'application de l'HACCP au compostage, permettrait par la maîtrise du procédé d'assurer l'hygiénisation et la non recolonisation du compost, et donc de garantir la sécurité sanitaire microbiologique du compost produit. De plus, une telle démarche doit permettre d'améliorer l'image de marque du compost.

Face à ces différents points, l'objectif du travail est d'étudier la faisabilité de l'application d'une telle démarche au compostage des boues de STEP. Cette étude doit permettre d'identifier les modalités d'application de l'HACCP au compostage des boues de STEP afin d'apporter les éléments d'analyse nécessaires à l'ADEME.

Afin d'appréhender le sujet dans sa globalité, trois grandes parties sont traitées dans ce rapport :

- Dans une première partie, une synthèse bibliographique permet d'une part de présenter les risques sanitaires microbiologiques liés à la présence de microorganismes pathogènes dans les boues, d'autre part de présenter le procédé de compostage et son effet hygiénisant, et enfin les principes de la démarche HACCP.
- Dans une seconde partie, nous nous intéresserons à l'applicabilité de l'HACCP, au plan théorique en déroulant le plan de travail proposé par le Codex Alimentarius, puis au plan pratique grâce aux visites de plates-formes effectuées dans le cadre de cette étude.
- Enfin, nous discuterons de la faisabilité de l'application de l'HACCP et de l'intérêt d'une telle démarche étant donné la réglementation actuelle concernant les boues et le compost.

2 - GENERALITES

2.1 RISQUE MICROBIOLOGIQUE ET COMPOSTAGE DES BOUES

Dans l'étude proposée, les risques que l'on souhaite maîtriser sont ceux liés à la présence de microorganismes pathogènes dans les boues et le compost. Cette première partie permet de dresser un bilan sur la nature de ces risques et d'évaluer dans quelles mesures ce type de risque est quantifiable.

2.1.1 Identification du danger

Les microorganismes pathogènes sont de quatre types : les virus, les bactéries, les parasites et les champignons. Les microorganismes potentiellement rencontrés dans les boues ou le compost, peuvent avoir deux origines :

1. Les microorganismes primaires qui ont une origine fécale. Les rejets des eaux vannes et pluviales dans le réseau sont la source d'une charge microbienne et parasitaire dans les effluents urbains traités au niveau des STEP. Ainsi, les boues issues du traitement de ces eaux concentrent cette charge qui est fonction de différents facteurs : le mode de traitement au niveau de la STEP, l'état de santé de la population reliée au réseau, les structures reliées (hôpitaux, abattoirs...) et les animaux vivant dans le réseau. Ces pathogènes présents dans le matériau brut à composter sont susceptibles de disparaître au cours du compostage.

2. Les microorganismes secondaires : présents initialement dans les boues (ou l'agent structurant), ils se développent au cours du compostage. Ce sont des champignons et des bactéries mésophiles et thermophiles qui jouent un rôle dans la dégradation de la matière organique lors de la phase de maturation. Le plus connu de ces microorganismes est *Aspergillus fumigatus* [6]. Ces microorganismes (ou les spores et toxines synthétisés) sont allergènes et/ou toxiques. La voie principale d'exposition à ces dangers est la voie aérienne : l'inhalation d'aérosols ou de poussières émises peut entraîner des allergies ou/et provoquer la colonisation de l'appareil respiratoire externe [23]. Dans la suite de l'étude, les risques liés à la présence des organismes secondaires ne seront pas considérés. En effet, les moyens de maîtrise du risque lié à la présence de ce type de microorganismes ne sont pas connus : les paramètres influençant leur multiplication et les paramètres favorisant leur dispersion. Seuls des méthodes de protection des populations exposées (travailleurs) existent : port de masque...

La présence des microorganismes pathogènes d'origine fécale, dont une liste (non exhaustive) est présentée dans le tableau ci-dessous peut être à l'origine des infections suivantes.

Micro organisme	N ₅₀	D.M.I.	Pathologie(s) Associée(s)
▪ BACTERIES			
<i>Salmonella spp.</i>	10 ⁶	10 ⁵ à 10 ⁹	Typhoïde – Paratyphoïde – Entérite
<i>Listeria spp.</i>			Listériose
<i>Campylobacter</i>		Lait 10 ² Eau 10 ³ à 10 ⁴	Campylobactériose
<i>Yersinia enterocolitica</i>		3.5 10 ⁹ (volontaire)	Yersiniose
<i>Shigella dysenteriae</i> <i>Shigella flexneri.</i>	383 6400	10 ¹ à 10 ² /10 ² à 10 ⁵	Dysenterie – Shigellose
<i>Mycobacterium spp.</i>			Tuberculose – Granulome de la peau
<i>Staphylococcus spp.</i>		10 ⁶ (sujet sain) 10 ² (peau lésion)	Staphylococcie
<i>Vibrio cholerae</i>	10 ³ à 10 ¹¹	10 ⁸ à 10 ¹¹ (sjt sain) 10 ³ à 10 ⁴	Choléra – Entérites
▪ Germes témoins de contamination fécale			
<i>Clostridium spp.</i>			Gangrène – Botulismes – Tétanos
▪ PARASITES			
<i>Ascaris spp.</i>	1	1 à 10 œufs embryonnés	Ascariodose
<i>Trichuris</i>			Trichocéphalose
<i>Toxocara</i>			Toxocarose ou larva migrans viscérale à <i>Toxocara</i>
<i>Taenia saginata</i>			Homme : Taeniasis Animal : Cysticercose
<i>Hymenolepis</i>			Hyménolépiose
<i>Cryptosporidium</i>	100 oocystes		Cryptosporidiose
<i>Giardia intestinale</i>	35	10 à 100 kystes	Giardiose – Giardiase – Lambliaose
<i>Entamoeba histolytica</i> ou Amibe			Amibiase
▪ VIRUS			
<i>Enterovirus</i>		~ 10-15 (<50)	Poliomyélite
<i>Hepatovirus</i>		~10	Hépatite aiguës ou chroniques
<i>Adenovirus</i>			Conjonctivites, infections respiratoires
▪ Virus des gastro-entérites			
<i>Rotavirus</i>		1	Gastro-entérites infantiles
<i>Adénovirus entériques</i>			Gastro-entérites
<i>Calicivirus</i>			Gastro-entérites
<i>Astrovirus</i>			Gastro-entérites

Tableau 1 : liste de microorganismes d'origine fécale – N₅₀ (La dose ingérée provoquant 50% d'infection dans une population exposée) et DMI (Dose Minimale Infectante) pour l'ingestion correspondante – Pathologies associées [15,17,29,34,40]

2.1.2 Voies d'expositions au danger

Depuis leur source (les boues de STEP), les agents pathogènes sont amenés à se disperser dans l'environnement pour aller toucher les populations cibles (humaines, animales et végétales). Il existe différentes voies d'exposition représentées sur la figure 1 :

- les voies d'exposition directes caractérisées par l'absence d'étapes intermédiaires dans l'environnement (inhalation, ingestion ou contact direct avec les boues)

- les voies d'exposition indirectes font intervenir une étape supplémentaire dans le transfert de la source à l'espèce cible (contamination des ressources en eau...)

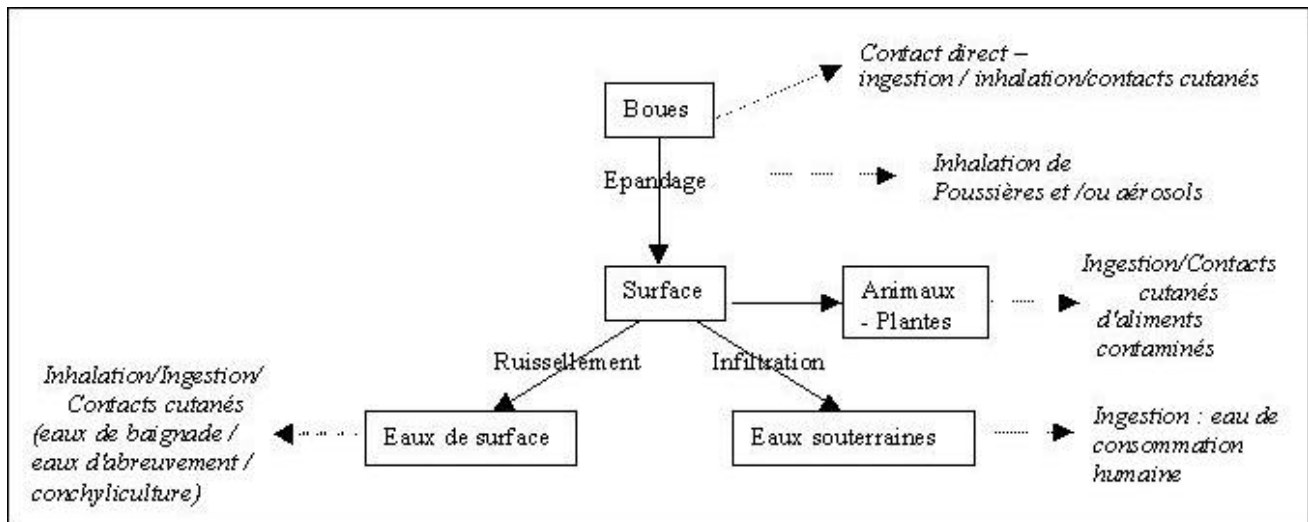


Figure 1 : les principales voies d'exposition pour les pathogènes après épandage sur les terres. [37]

2.1.3 Probabilité d'expression du danger

Afin de contaminer les populations humaines et animales par voie directe ou indirecte (Cf. 2.1.2), les microorganismes pathogènes doivent d'une part être présents dans la boue, puis pouvoir persister (et conserver leur pouvoir pathogène) dans ou sur le sol, la pâture ou les fourrages et les autres supports jusqu'au contact avec l'espèce cible.

La survie des microorganismes dans l'environnement est peu ou pas connue. En effet leur devenir dans le sol après épandage est fonction de différents facteurs physiques (température, intensité lumineuse, texture du sol), chimiques (pH, présence de MO) et biologiques (présence de microflore antagoniste) [13,21,26,36,37,38]. En outre, certains pathogènes possèdent des formes de résistance ; ils peuvent, à métabolisme ralenti avoir des capacités de survie plus importantes : les protozoaires sous forme de kystes ou oocystes, les helminthes sous forme d'œufs et certaines bactéries sous formes sporulées. Ces organismes, une fois sur ou dans le sol ont la possibilité de se déplacer soit par infiltration, ils peuvent alors atteindre les nappes d'eaux souterraines ou par ruissellement, ils peuvent se diriger vers les eaux de surface. Cependant le transport de ces organismes est complexe à estimer [37]. Quant à la survie des germes sur les végétaux, elle est beaucoup plus limitée que sur ou dans le sol puisqu'ils sont exposés aux radiations et à la dessiccation. Cependant, dans les plis et la face inférieure des feuilles, protégé, le microorganisme peut survivre plus longtemps.

D'autre part, la probabilité d'infection des populations par les microorganismes fait intervenir différentes notions :

- la relation Dose-Réponse, dans le cas d'un risque microbiologique, qui peut s'exprimer par l'intermédiaire d'une Dose Minimale Infectante (ou D.M.I.) correspondant à la quantité minimale de germes nécessaires pour déclencher l'infection. Cette notion est imprécise et fluctuante [16], cependant, certains auteurs indiquent ces valeurs pour divers microorganismes (Cf. Tableau 1).

- La réceptivité ou l'aptitude d'un organisme à permettre la multiplication de l'agent pathogène. En effet, pour contaminer un hôte, celui-ci doit être réceptif à l'agent pathogène. La population réceptive est nommée espèce cible.
- Enfin, l'état de santé de la population soumise au danger : certains hôtes n'opposeront pas la même résistance aux microorganismes (hôtes jeunes ou très âgés, immunodéprimés....)

L'ensemble de ces paramètres n'est pas toujours connu, ainsi la probabilité d'expression du danger reste complexe à estimer.

2.1.4 Conclusion

Ces différents points montrent qu'il est complexe d'évaluer le risque sanitaire lié à l'épandage d'un lot de boues d'autant plus que de nombreux microorganismes susceptibles d'être présents sont identifiés mais que finalement peu sont dosés dans les boues.

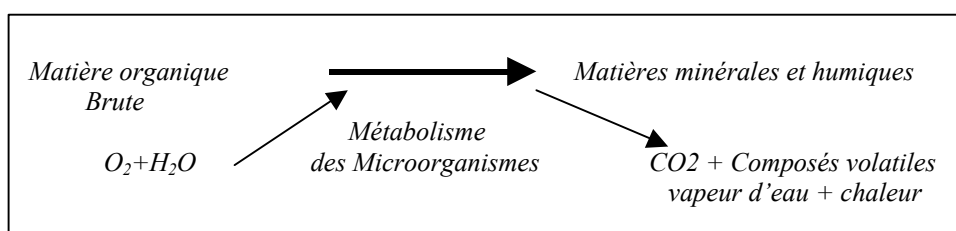
Cependant, l'épandage des boues sur les terres va contribuer à la contamination de l'environnement par les microorganismes pathogènes. Afin de contrôler l'incidence d'une telle pratique sur la santé humaine ou animale, des études épidémiologiques sont menées [28,16] et des cellules de veille sanitaire ont été créées. A l'heure actuelle, il n'est pas prouvé que l'épandage des boues d'épuration ait un effet direct sur la santé de l'homme [24]. Un rapport a été établi entre l'épandage des boues et la présence de bovins et d'ovins porteurs de salmonelles. De plus, cette filière de valorisation contribuerait à l'infection du bétail par les cysticerques (entraînant la présence de *T. saginata* chez l'homme)[16,19]. La Cellule de Veille Sanitaire Vétérinaire des Epandages de Boues d'Épuration Urbaines quant à elle, n'a constaté que très peu d'accidents sur le bétail au cours des quatre dernières années. De plus, ces accidents sont imputables à des mauvaises pratiques d'épandages.

Afin de limiter ce risque sanitaire, des précautions d'usage des boues (conditions, périodes et méthodes d'épandage) permettent d'éviter qu'un incident d'ordre sanitaire ne survienne. Des précautions supplémentaires consistent à traiter la boue afin que le produit épandu sur les terres soit hygiénisé, par exemple en la compostant.

2.2 LE COMPOSTAGE DES BOUES DE STEP

2.2.1 Principe du compostage [11,12,15,32,36,40]

Les boues contiennent une forte concentration en matière organique très fermentescible, le compostage (processus biologique) permet de stabiliser cette matière organique, pour obtenir du compost. Les constituants les plus simples de cette matière organique sont minéralisés, alors que les substances les plus complexes sont



humifiées et polymérisées en composés proches de l'humus naturel (Cf. encadré ci-dessous).

La présentation physique de ces boues, massives et peu poreuses, impose l'adjonction d'un adjuvant (agent structurant) donnant une structure au tas et garantissant ainsi des conditions d'aérobiose :

Le compostage des boues de STEP s'effectue en différentes étapes :

- le broyage de l'agent structurant (lorsqu'il s'agit de déchets verts) ;
- le mélange de l'agent structurant et de la boue puis l'homogénéisation du substrat;
- la phase active du compostage (ou phase dite de "fermentation"). Au cours de cette étape l'aération du substrat est nécessaire (Cf. § ci-dessous), pour cela, différents procédés existent :
 - les systèmes ouverts avec
 1. Un système d'aération par retournement périodique des andains.
 2. Un système d'aération forcée par insufflation ou aspiration d'air.
 - les systèmes fermés. Le substrat est placé dans des réacteurs verticaux ou horizontaux dans lesquels un flux d'air est instauré. Ce type de procédé de compostage demande un gros investissement financier. Ainsi, il est peu fréquent et ne sera donc pas étudié.
- la phase de maturation ;
- le broyage, le criblage et le tamisage du compost qui peuvent s'effectuer avant la fin de la maturation ;
- le stockage du compost mûr avant son utilisation.

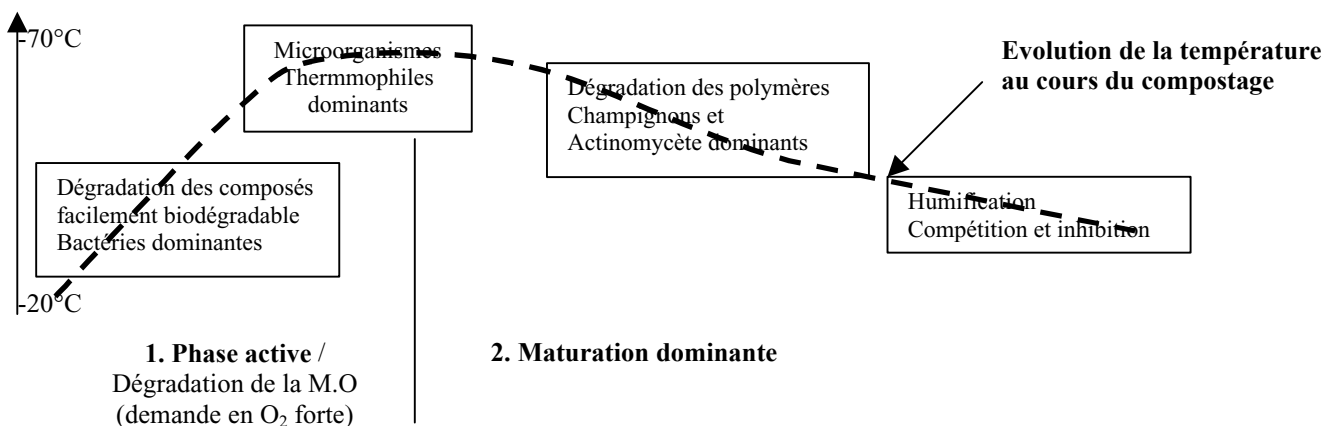


Figure 2 : les grandes étapes du compostage des boues, l'évolution de la température du substrat et la nature des microorganismes présents [28].

Les différents groupes de microorganismes ont chacun un rôle dans le processus complexe du compostage. L'activité microbiologique est influencée par les différents paramètres qui entrent en jeu dans le métabolisme des microorganismes. Ainsi, afin de mener à bien le compostage, il est possible d'agir sur l'environnement de ces organismes en contrôlant les paramètres suivants :

1. La composition du substrat et son aptitude à être assimilé par les microorganismes [25,41,42]

Il faut considérer l'accès à la source nutritive et l'équilibre entre les nutriments notamment le rapport C/N.

L'accès à la source nutritive concerne surtout le carbone, il s'agit d'assurer une surface de contact suffisante entre le substrat et la biomasse – cette surface de contact dépendra du mélange initial de la boue avec l'agent structurant. La réduction de la taille des particules éventuellement lors du broyage de la matière première

permet d'accroître cette surface de contact. Cependant, la taille des particules ne doit pas influencer négativement sur l'aération du tas.

En fonction du type de composé organique présent, la matière organique sera plus ou moins facilement assimilable par les microorganismes (par exemple la lignine oppose une forte résistance au compostage).

Concernant les nutriments essentiels, un équilibre entre les teneurs en carbone et en azote est indispensable, l'optimum théorique de composition initiale du substrat est de l'ordre de 30. Sachant qu'une partie du carbone est respiré (dégagement de CO₂ au cours du compostage) la tendance moyenne finale est un équilibre C/N de l'ordre de 10.

2. Le maintien d'un milieu aérobie

Ce facteur essentiel pour le compostage, conditionne la dégradation aérobie de la matière organique du substrat. Les réactions de bio oxydation nécessitent un apport d'oxygène durant toute la phase de compostage (l'O₂ est utilisé comme accepteur final d'électrons pour la respiration aérobie). Les conditions sont défavorables en deçà de 10% dans l'atmosphère de l'andain (anaérobiose jugée prédominante en deçà de 5%). L'oxygénation nécessite un apport d'air soit par convection, soit par aération forcée. La hauteur du tas (1,5 à 3 m est une hauteur optimale [13,42], pour permettre la bonne aération des tas, limiter l'influence de la pluie sur le bilan hydrique et limiter les pertes de chaleur) et la porosité à l'air sont deux facteurs importants qui conditionnent la bonne aération du substrat (et la distribution homogène de l'oxygène dans le tas). Cependant, lorsque l'aération est trop importante, le compost obtenu est mal décomposé et desséché.

3. La maîtrise de la température, facteur influençant l'activité biologique

L'oxydation biologique du carbone permet la libération d'énergie. Une partie est dissipée sous forme de chaleur et provoque une augmentation de la température du tas de compost. Ceci va permettre l'activité biologique des microorganismes thermotolérants et thermophiles. L'activité biologique présente un maximum pour une température précise fonction du substrat. Certaines stratégies de conduite de l'aération forcée, par assujettissement à la température permettent de maîtriser ce paramètre et de maximiser l'activité biologique globale. Remarque : le dégagement de CO₂ (signe d'une activité biologique intense) est maximum à 55°C [24].

4. La teneur en eau : le maintien d'une humidité optimale

Concernant l'activité biologique, la teneur en eau doit se situer entre un maximum au-delà duquel l'oxygénation se trouve affectée (les pores sont comblés par l'eau, des conditions anaérobies s'instaurent), à partir de 50 à 70% d'eau et un minimum limitant pour l'activité elle-même, à partir de 40% d'eau généralement. Cette inhibition de l'activité biologique entraîne une dégradation incomplète de la matière organique. La disponibilité de l'eau pour les microorganismes est un facteur important qui est étroitement lié à la composition du substrat et à l'évolution de la température au cours du compostage. Au cours du compostage, l'élévation de la température de l'andain favorise la perte d'eau par évaporation. L'humidification des tas est possible mais l'injection d'eau doit se faire de façon homogène (à l'occasion d'un retournement par exemple). Ce paramètre va aussi conditionner l'utilisation du compost, lors de l'épandage, celui-ci ne doit pas être trop sec ou trop humide.

Remarques :

- Lorsque la plate-forme de compostage est située en extérieur, les fortes précipitations vont être un facteur limitant en modifiant le bilan hydrique du substrat en cours de compostage. De plus, le compost mûr ou en

maturation est relativement sensible aux apports d'eau atmosphérique (= une éponge), il est donc conseillé de l'abriter.

- Des composts dont la matière sèche excède 65% cachent souvent un manque de maturité, le processus étant artificiellement stoppé par insufflation d'air, le substrat est séché avant d'être mature.

Cet écosystème microbien présente deux caractéristiques fondamentales : **stabilité** et **inertie**. Ainsi ce système est facile à déclencher et à entretenir mais il est plus difficile à orienter et à corriger quand cela s'avère nécessaire. Cependant les facteurs qui le régissent ainsi que les mécanismes de base sont connus. La qualité initiale du substrat [agent structurant + boues] joue un rôle important dans le déroulement du compostage : en effet le rapport C/N ainsi que le taux d'humidité vont fortement conditionner le compostage actif des boues mélangées à l'agent structurant [25].

2.2.2 Capacité hygiénisante du compostage

Le compostage est considéré par un grand nombre d'auteurs comme une des meilleures filières hygiénisantes. L'arrêté du 8 janvier 1998 définit l'hygiénisation comme "*un traitement qui réduit à un niveau non détectable les agents pathogènes présents dans les boues*". Dans le guide réalisé par l'ADEME [16] l'hygiénisation est définie comme "*une réduction bonne ou excellente (> 4 log) de la charge initiale en pathogènes*". Hormis la réduction des teneurs en microorganismes pathogènes, un traitement hygiénisant doit aussi éviter les recroissances bactériennes sur le produit obtenu. Afin de pouvoir produire un compost hygiénisé, il faut connaître les facteurs de survie et croissances des microorganismes pathogènes et identifier des microorganismes indicateurs permettant de contrôler l'hygiénisation du produit et la capacité hygiénisante du procédé.

2.2.2.1 Besoins et facteurs de croissances des microorganismes pathogènes d'origine fécale

Ce paragraphe présente l'influence des facteurs de l'environnement sur le développement des microorganismes pathogènes. Ces facteurs, présentés séparément, agissent conjointement sur la microflore du compost.

- Température : [10,13,21,30,38]

La plupart des microorganismes pathogènes d'origine fécale sont mésophiles et une augmentation trop élevée de la température peut avoir des conséquences néfastes sur ces organismes. La destruction des microorganismes pathogènes est possible grâce à une maîtrise du couple température – temps (Cf. Figure 3)

Voici, suivant les auteurs, les temps de séjours minimums nécessaires pour des températures données pour obtenir un compost hygiénisé :

	Durée et nombre de retournements
▪ En aération naturelle :	deux à quatre semaines à 50-60°C, sans retournement [16]
	trois semaines à 55°C, sans retournement [39]
	une semaine à 65°C, sans retournement [39]
	50°C pendant 5 jours avec des températures > 55°C pendant 4 heures [19]
	Durée
▪ En aération forcée :	une semaine à 60-65°C [34]
	trois jours supérieurs à 55°C [19]
	Durée
▪ En réacteur :	48 heures à 65-70°C [39]
	trois jours à 60-70°C [23]
	10 jours à 55°C [39]

L'EPA (Environmental Protection Agency) propose [10,38]:

- Une liste de procédés PSRP (Process to Significantly Reduce Pathogens) qui assurent une très forte réduction de la contamination microbiologique (agents pathogènes autres que œufs d'helminthes). Parmi ceux-ci, le compostage (quelle que soit la méthode) doit permettre une élévation de la température à 40°C pendant 5 jours. Pendant 4 heures au cours de ces 5 jours, la température doit dépasser 55°C ;
- Une liste de procédés PFRP (Process to Further Reduce Pathogens) qui permet d'obtenir des boues d'une haute qualité sanitaire pouvant être épandues sur toute culture sans aucune restriction. Parmi ceux-ci, le compostage doit permettre au substrat de se maintenir à une température supérieure ou égale à 55°C pendant trois jours. S'il s'agit d'une méthode de compostage par retournements, la température doit se maintenir à 55°C ou plus pendant au minimum 15 jours (durant cette période les andains sont retournés au minimum 5 fois) ;

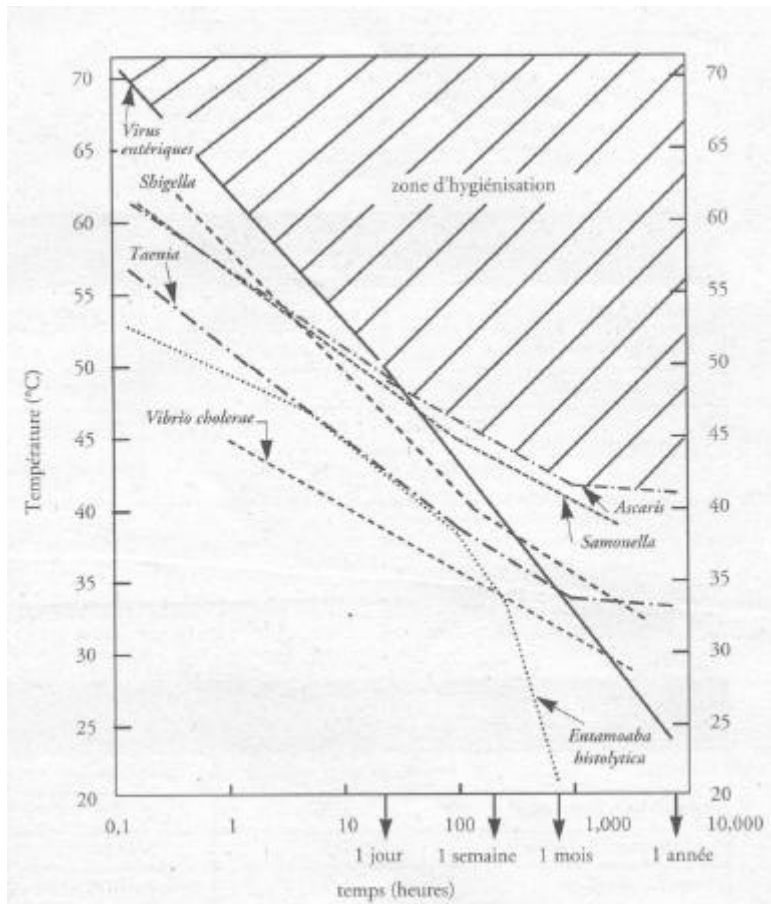


Figure 3 : les effets hygiénisants du couple temps-température dans le cas du compostage des boues d'épuration [18]

- Nature des nutriments : [12,13,24,30]

Les organismes pathogènes sont hétérotrophes, leur survie dépend de la présence et de la disponibilité de la matière organique : ils ont besoin d'une source de carbone soluble. Ainsi, la matière organique disponible doit être constituée d'éléments à courte chaîne carbonée (alcool, acide organique, sucres solubles...). Au cours du compostage, les microorganismes transforment la matière organique en matière humique et minérale, ces polymères formées ne sont plus assimilables par les organismes pathogènes d'origine fécale. Un compost stabilisé n'est donc pas propice au développement ou à la survie des microorganismes.

- Compétition avec les autres microorganismes : [30,36,38]

Ce paramètre est difficile voire impossible à maîtriser ; cependant, il est déterminant. Au sein d'un tas de compost, le nombre d'organismes indigènes saprophytes [12,13] est beaucoup plus important que le nombre d'organismes pathogènes d'origine fécale. Ces organismes indigènes possèdent l'avantage d'être dans leur environnement naturel. De plus, aux effets antagonistes de certains microorganismes s'ajoute la sécrétion de substances antibiotiques qui favorise l'élimination d'autres espèces.

- Conclusion :

1) La destruction des microorganismes d'origine fécale sera assurée grâce à une montée en température du substrat, le couple température – temps à appliquer sera fonction du mode d'aération du compost et de l'agent structurant utilisé.

2) Certaines bactéries, en particulier les salmonelles peuvent recoloniser les tas de compost. Les vecteurs de pollution (oiseaux, animaux, équipement) représentent la principale source de contamination [21]. Par la suite, la multiplication des bactéries sera fonction des conditions environnementales. En particulier, un matériau

biologiquement stable permettra d'éviter l'attraction des vecteurs par la maîtrise des odeurs et de prévenir d'une recolonisation par des bactéries en particulier les *Salmonelles* [28,36]. Des tests dont la fiabilité est sujette à discussion, ont été mis au point afin de juger de la maturité du compost [27].

2.2.2.2 Choix d'organismes indicateurs [16,23,26,40]

Pour des raisons techniques et économiques, il n'est pas possible d'effectuer un inventaire exhaustif des microorganismes pathogènes présents dans les boues ou le compost. Ainsi, on utilise le dénombrement d'organismes indicateurs d'hygiénisation et de marqueurs d'efficacité de traitement.

Un germe indicateur doit être facilement dénombrable, cultivable et identifiable en routine. D'autre part, sa densité dans la boue doit être corrélée à celle de certains pathogènes (peu d'indicateurs semble avoir cette capacité, selon certains auteurs, « un germe indicateur est indicateur de lui-même » [16,38]). Enfin, cet indicateur doit présenter des analogies avec les autres pathogènes, concernant surtout sa résistance dans l'environnement et sa réaction au traitement appliqué. La recherche bibliographique effectuée permet d'identifier certains microorganismes présentant des qualités en tant qu'indicateur :

1. La capacité du *Clostridium perfringens* à sporuler dans des conditions défavorables lui permet de résister à des températures élevées (10 minutes à 80°C [34], 1 semaine à 70°C [40]). Ce germe est indicateur d'une contamination fécale et il semble qu'aucune recontamination n'ait lieu au cours du traitement [23,40]. L'étude réalisée par F. JEHANNO [23] a permis d'identifier *Clostridium perfringens* comme un indicateur privilégié pour évaluer l'efficacité du traitement de compostage.
2. Les Coliformes Thermotolérants sont des hôtes naturels et systématiques du tube digestif humain. Il sont donc présents en forte concentration dans les boues. Bien qu'ils soient relativement résistants à la température, un abattement de leur charge est possible durant le compostage. Cependant une recontamination des tas est quasi-impossible à éviter [23] : il peut s'agir d'une contamination par des éléments extérieurs (vecteurs de pollution...) ou d'une contamination par des poches de résistance. Ces germes sont utilisés par la réglementation comme indicateurs d'efficacité de traitement (Article 16 de l'Arrêté du 8 janvier 1998).
3. Les salmonelles sont des bactéries sensibles à la chaleur. Cependant, elles sont facilement identifiables et dénombrables. De plus, on peut craindre une contamination (par des vecteurs de pollution) puis une recolonisation des tas de compost avant et pendant le stockage. Un grand nombre d'auteurs proposent d'utiliser les salmonelles comme indicateurs d'hygiénisation [12,15,23,29,36]
4. Les œufs d'ascaris sont faciles à observer et plus résistants que les autres œufs d'helminthes. Ainsi, différents auteurs proposent d'utiliser ce microorganisme comme indicateur d'hygiénisation pour les parasites [15,29,38]
5. Le coliphage f_2 est très résistant à la chaleur [16,38] ce qui en ferait un indicateur fiable de risque et d'efficacité de traitement [38].

La **réglementation** (Article 16 de l'Arrêté du 8 janvier 1998) quant à elle propose de respecter les recommandations émises par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHP) : les boues sont considérées comme hygiénisées quand, à la suite de traitement spécifique (tel que le compostage) les trois types d'agents pathogènes (*Salmonella*, Entérovirus et Oeufs d'helminthes viables) sont non détectables, soit :

- *Salmonella* < 8 NNP/10g MS
- Entérovirus < 3 NPPUC/10g MS
- Oeufs d'helminthes pathogènes viables < 3/10 g MS

Lors de la mise en service d'une unité (hygiénisante), les analyses effectuées en sortie de la filière doivent respecter les seuils proposés par le CSHPF et une analyse des coliformes thermotolérants est effectuée. Ensuite les traitements hygiénisants font l'objet d'une surveillance des coliformes thermotolérants une fois tous les quinze jours, les concentrations mesurées sont interprétées en référence à celles obtenues lors de la caractérisation du traitement.

Le choix d'indicateurs fiables est largement discuté dans la littérature, cependant, il convient de sélectionner un organisme indicateur d'efficacité de traitement : pour le compostage, *Clostridium perfringens* semble être un marqueur fiable. Il est nécessaire, au moins dans un premier temps, de suivre en parallèle les concentrations en microorganismes indicateurs de risques : Entérovirus, Oeufs d'Helminthes et *Salmonella*. Ces trois microorganismes proposés par la réglementation représentent les trois classes de pathogènes présents dans les boues (sauf les champignons).

2.2.3 Conclusion

Le compostage permet la transformation de matières premières : boues et agent structurant, en compost au cours d'un procédé identifié dans ce paragraphe. Cette filière de traitement est hygiénisante lorsque les paramètres suivants sont maîtrisés au cours du compostage : température, temps et degré de maturité. Afin de garantir l'hygiénisation du compost produit, l'application d'un système d'assurance qualité est envisagé. Le système choisi est l'HACCP et est présenté dans la suite du document.

2.3 LA DEMARCHE HACCP

2.3.1 Présentation de la démarche [5]

La démarche HACCP : Hazard Analysis – Critical Control Point ou Analyse des Risques – Points Critiques pour leur Maîtrise, est une méthode développée en 1970 aux USA pour l'industrie chimique. Elle est maintenant appliquée dans les industries agro-alimentaires pour assurer la sécurité des aliments.

Selon cette démarche, on s'efforce d'identifier les dangers liés à chacun des stades de la production, de la transformation ou de la préparation d'un produit. Par la suite, il est possible de déterminer les stades où l'on peut agir efficacement afin de maîtriser les risques sanitaires. Ainsi, les mesures de lutte visent des opérations du procédé bien définies, contribuant de façon décisive à la sécurité finale du produit.

Cette démarche repose sur sept principes de base et sa mise en œuvre passe par la réalisation d'une séquence logique de 12 étapes présentée dans le paragraphe 2.3.2.

Dans le but de représenter simplement ce système d'assurance de la sécurité sanitaire, certains auteurs [5] identifient un préalable à cette démarche et trois composants essentiels :

- Le préalable :
- Formation d'une équipe pluridisciplinaire ;
 - Description du produit ;
 - Identification de son utilisation attendue ;
 - Description du procédé (opérations de production, fabrication, distribution).

Les composants :

- A. Analyse des risques : L'identification, sur une base scientifique rigoureuse, des dangers¹ significatifs par rapport à la salubrité du produit et pour chacun d'eux évaluation du risque correspondant
- B. Le choix des moyens de maîtrise adaptés au risque spécifiquement associé au couple produit/procédé dans les conditions de production. Il s'agit de déterminer des points (étape, opération, facteur) déterminants pour prévenir ou réduire chaque danger, ainsi que les mesures appropriées qui s'y réfèrent.
- C. L'assurance que les mesures nécessaires pour prévenir les problèmes identifiés pour chaque CCP, sont mises en œuvre dans des conditions maîtrisées comprenant :
 - Des critères d'exécution correspondant à des limites critiques d'intervention au niveau des CCP ;
 - Des instructions de travail ;
 - Un suivi approprié des opérations correspondant à une surveillance au niveau des CCP ;
 - Des enregistrements appropriés ;
 - L'examen et le traitement des non-conformités correspondant à des actions correctives ;

¹ Dans le cadre de l'étude par danger on entend, la présence, la croissance ou la survie de micro-organismes pathogènes.

La figure 4 permet de récapituler cette présentation simplifiée de la démarche HACCP à l'aide d'un schéma sur lequel les différentes étapes du plan HACCP présentées dans le paragraphe suivant sont insérées (numéros dans les cercles en gras).

2.3.2 Application de l'HACCP [5,7,8,20,31,33]

La mise en œuvre des principes de l'HACCP passe par la réalisation d'une séquence logique d'activités programmées correspondant à la « méthode HACCP ». Cette séquence a été établie au plan international par un groupe de travail spécialisé du Codex Alimentarius (Alinorm 93/13 A – Appendix II). Cette démarche est par ailleurs recommandée par la CEE dans la Directive Hygiène des denrées alimentaires (93/43) du 14 juin 1993. Elle identifie 7 principes de base (signifiés entres parenthèses ci-dessous) et se décline en 12 étapes :

1. **Réunir une équipe** pluridisciplinaire : l'équipe HACCP.
2. **Décrire le produit** aussi bien dans sa forme initiale que dans sa présentation finale.
3. **Identifier l'utilisation attendue** : utilisation courante ainsi que les utilisations anormales prévisibles ;
4. **Construire un diagramme de fabrication** (description des conditions de fabrication). L'élaboration de ce diagramme nécessite de procéder à un découpage en étapes opérationnelles.
5. **Confirmer sur place le diagramme de fabrication** par une visite sur le site de l'équipe HACCP
6. Pour chaque étape, **lister les dangers et les mesures préventives**. Pour identifier les dangers, une recherche bibliographique est très utile et permet de limiter le nombre d'expérimentations à réaliser. Il s'agit d'établir la liste pour chaque danger, et d'identifier pour chaque étape toute situation normale ou anormale, introduisant un danger afin d'évaluer le risque correspondant. **(1)**
7. **Déterminer les points critiques de contrôle (CCP)** des dangers. Ceci grâce à un arbre de décision (Cf. Annexe 1) en répondant à un certain nombre de questions. Il s'agit de déterminer les points où l'absence de maîtrise entraîne l'apparition d'un risque ou l'augmentation de celui-ci jusqu'à un niveau inacceptable. **(2)**
8. **Etablir les limites critiques au niveau des CCP**, limite à partir de laquelle une action corrective est réalisée. Cette étape doit également fournir la tolérance acceptée sur les mesures. **(3)**
9. **Etablir un système de surveillance des CCP** pour détecter les pertes de maîtrise des CCP. Dans cette étape il s'agit de déterminer les paramètres à surveiller, la technique utilisée... **(4)**
10. **Etablir un plan d'actions correctives** à mettre en place lorsqu'une perte de maîtrise des CCP est constatée. Ces actions correctives doivent être le plus efficace possible. **(5)**
11. **Vérifier que le système est appliqué et qu'il est efficace**. **(6)**
12. **Etablir le système documentaire** qui comprend une phase relative au plan HACCP et une partie consacrée aux enregistrements des opérations réalisées. **(7)**

La démarche HACCP et son application selon les recommandations du *Codex Alimentarius* se synthétisent comme dans le figure 4.

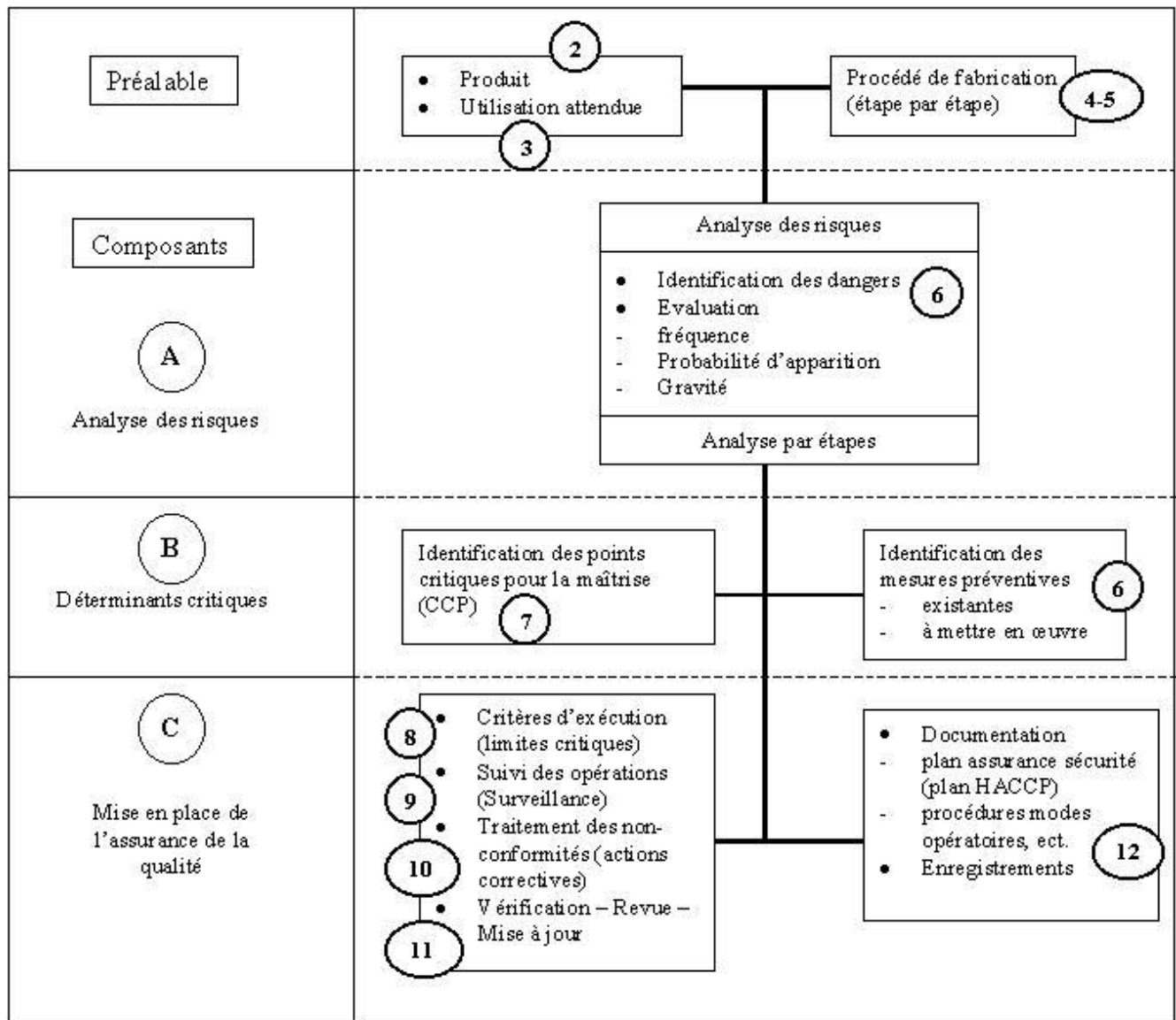


Figure 4 : schéma de la démarche HACCP

Les points du plan de travail proposé par le *codex Alimentarius* sont indiqués dans les cercles en gras.

2.3.3 Critique de la démarche HACCP [1,2,4,14]

Cette démarche permet d'apporter une meilleure garantie de la qualité au plan sanitaire du produit qu'un contrôle effectué sur le produit final. En effet, l'HACCP qui est dirigée vers la sécurité permet de prévenir d'un risque sanitaire par le contrôle au niveau des points critiques de paramètres identifiés. De plus, elle est adaptée à un couple produit / procédé, ce qui assure une bonne adéquation entre le problème rencontré et la solution envisagées.

Par son analyse organisée et systématique, ce système permet de retracer l'ensemble du processus et de dégager toutes les causes à l'origine du problème. Ensuite, elle permet de mettre en place les moyens adaptés orientés vers la prévention de ces problèmes identifiés. Cette démarche permet de réaliser un véritable audit produit-procédé. Ainsi, L'HACCP permet une approche intéressante pour appréhender un procédé, améliorer les pratiques de fabrication mises en œuvre et surveiller cette mise en œuvre. Le plan de travail proposé par le *Codex Alimentarius* permet une application progressive de l'HACCP en connaissant les objectifs de chaque

étape et donc le travail qui en découle. De plus, l'HACCP peut évoluer suivant les conditions techniques, économiques et réglementaires du moment.

Cette démarche est efficace car elle oblige une prise de conscience de tout le personnel à propos des mesures de sécurité appliquées et des procédures de surveillance mises en place. Il s'agit d'une réflexion globale sur les dangers présents et les solutions les plus adaptées à mettre en œuvre.

Mais, cette démarche reste un outil de travail, c'est une technique de gestion de la qualité sanitaire du produit. Afin d'être vraiment efficace, l'équipe HACCP doit effectuer les recherches nécessaires et entamer une réflexion complète pour identifier les dangers, établir des seuils d'alertes, les actions correctives....

2.3.4 Conclusion

La température, les caractéristiques physico-chimiques du substrat et le degré de maturité du compost sont les trois principaux paramètres du compostage qui permettent de détruire les germes pathogènes d'origine fécale et d'éviter une recolonisation des tas par des bactéries, principalement les salmonelles. Leur maîtrise doit permettre de minimiser le risque sanitaire lié à la présence d'organismes pathogènes d'origine fécale au cours de l'utilisation du compost sur les terres (le risque sanitaire pour les employés des plates-formes n'est pas considéré ici).

Les dangers, ainsi que les facteurs permettant la maîtrise du risque sont identifiés. Ainsi, l'application de l'HACCP semble envisageable et doit permettre de déterminer les moyens à mettre en œuvre durant le procédé de compostage afin d'assurer l'hygiénisation du compost et la non-recolonisation des tas durant le stockage.

Dans la suite de l'étude, le déroulement du plan de travail en douze points permettra d'identifier les contraintes et les limites d'une telle démarche dans ce domaine tant au plan théorique qu'au plan pratique.

3 - APPLICATION DE LA DEMARCHE HACCP AU COMPOSTAGE DES BOUES DE STEP

Suite à la présentation des principes de l'HACCP et des différents facteurs de maîtrise du procédé de compostage, nous nous intéressons à l'applicabilité d'une telle démarche à cette filière de traitement des boues. Dans un premier temps, il s'agit d'une approche théorique permettant de vérifier si l'HACCP est applicable aux principes du compostage et dans quelles mesures. Ensuite, la visite de différentes plates-formes permet de dresser un bilan sur les pré-requis nécessaires et les contraintes que l'application d'une telle démarche impose sur le plan pratique.

3.1 LE PLAN DE TRAVAIL EN DOUZE POINT : GUIDE EN VUE DE LA MISE EN PLACE DE L'HACCP

Dans cette première partie, le plan de travail en douze points (présenté dans la partie précédente) est appliqué à un procédé général de compostage des boues de STEP représenté sur la figure 5.

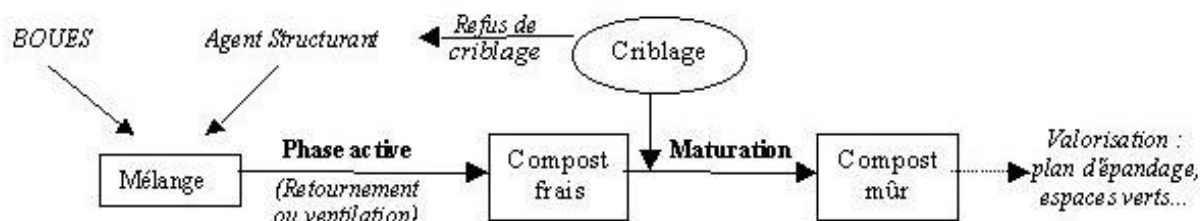


Figure 5 : schéma théorique du compostage

Ce chapitre possède trois objectifs :

1. Dérouler le plan de travail de l'HACCP et identifier des points critiques pour le compostage.
2. Emettre des recommandations en vue de la réalisation d'un guide pratique à destination des exploitants de plates-formes. Ce guide permettra de se familiariser avec la démarche et éventuellement d'aider les gérants à l'appliquer sur leur site.
3. Lister les contraintes imposées par une telle démarche et les limites d'ordre techniques, scientifiques, humaines ou économiques qui peuvent apparaître.

3.1.1 Constitution de l'équipe HACCP [31, 33]

Il s'agit de constituer une équipe pluridisciplinaire. Cette équipe rassemble des personnes possédant les connaissances spécifiques et l'expérience appropriée au produit dont la fabrication va être analysée.

Les compétences nécessaires concernent : le compostage, l'hygiénisation, le système qualité existant, l'HACCP (principes de bases, plan HACCP,...), la réglementation en vigueur, les outils disponibles sur la plate forme.

Mode opératoire

- Pour cela, une grande partie des employés travaillant sur le site doit être impliquée, leur connaissance du procédé de fabrication est essentielle. Ils sont en mesure d'évaluer la faisabilité des actions à mettre en

place sur le site. En général, cette équipe comprend un responsable qualité et un responsable de la production.

- D'autre part, il est conseillé de faire appel à des experts externes pour des aides ponctuelles (recherche et développement, réglementation, microbiologie...) ou dans le cadre de formations préliminaires. Ces experts permettent de compléter les connaissances qui font défaut à l'entreprise

Il est important de spécifier que cette équipe est fonctionnelle et non hiérarchique.

Formation préliminaire : Il est essentiel de former l'équipe aux principes de l'HACCP et à leur application. Cette formation de courte durée a pour but de présenter les objectifs de l'étude, les principes de la démarche et les plus que cette démarche va apporter.

Organisation de l'équipe : L'équipe comprend un coordinateur et un secrétaire technique. Le responsable qualité du site (quand il existe) est à même de jouer le rôle du coordinateur.

Planification de l'étude :

- Une date d'échéance de la mise en place du système HACCP doit être fixée.
- La durée des réunions doit être fixée à une demi-journée pour être efficace [31]
- Les responsabilités de chacun doivent être clairement définies.
- Les réunions doivent être espacées pour que les membres de l'équipe disposent d'assez de temps pour les travaux intermédiaires.

Difficultés prévisibles :

- L'implication de l'ensemble des employés du site qui peuvent ressentir l'application d'une telle démarche comme une remise en cause, une surcharge ou un moyen de contrôle de leur travail.
- Les moyens disponibles sont à définir, ils nécessitent du temps accordé à l'équipe et de l'argent : pour l'achat de matériel de contrôle (sonde de température...), pour les analyses microbiologiques, pour faire appel à des experts externes ou à des formateurs. De plus, il faut prendre en compte les frais qui s'ajoutent dans le cas d'une évaluation de la démarche par un organisme certificateur tel que l'AFAQ.

Implication de l'ADEME :

Les compétences de l'ADEME (ou de structures telles que les Chambres d'Agricultures) lui permettent d'agir en tant que conseiller ou expert dans différents domaines.

Au sein de l'ADEME, le programme GBD (Gestion Biologique des Déchets) a permis de mettre en place dans certaines régions un Club Qualité qui rassemble l'ensemble des acteurs concernés par ce programme. Au sein de ce club qualité, il est possible d'envisager la création d'une commission chargée de promouvoir la démarche HACCP auprès des gérants de plates-formes et éventuellement de participer sous différentes formes à sa mise en place : aide financière dans le cadre d'une application, formations préliminaires des entreprises gérant les sites, conseil....

3.1.2 Description du produit

Il convient de donner une description complète du produit au cours du procédé de compostage : du produit brut au produit distribué. L'étude doit être réalisée pour un couple produit/procédé spécifique.

Mode opératoire

Il faut dans un premier temps déterminer les champs de l'étude puis rassembler les données relatives au produit aux différentes étapes de sa transformation.

a. Définition des champs de l'études [31, 33]

Le procédé concerné est le compostage des boues de stations d'épuration.

Les limites amont et aval de l'étude : l'objectif de l'application de la démarche HACCP est de garantir l'hygiénisation et la non recolonisation du tas de compost avant l'épandage sur les terres. Ainsi, notre étude portera sur la phase d'élaboration du compost : l'étape initiale correspond à la réception des matières premières (boues et agent structurant) sur le site et l'étape finale correspond à l'utilisation du compost sur les terres. L'étude s'étend à la zone où la maîtrise du procédé est possible afin de répondre aux objectifs fixés.

Le type de risques que l'on souhaite maîtriser par application d'une telle démarche sont les risques liés à la présence, la survie ou la croissance de microorganismes pathogènes d'origine fécale. Une action sur les autres dangers (présence d'ETM, de MPO ou de microorganismes secondaires) présentés dans les parties précédentes pourra être envisagée par la suite. La démarche HACCP ne portera alors plus sur les mêmes points (Cf. 5-Conclusion)

b. Rassembler les données relatives au produit

1. Les matières premières :

Les deux matières premières qui entrent en jeu dans la fabrication du compost sont les boues de station d'épuration et l'agent structurant. La connaissance des caractéristiques de ces deux éléments entrant dans la composition du substrat est nécessaire d'une part afin d'ajuster les proportions du mélange avant le début de la phase active de compostage, d'autre part afin de pouvoir estimer les dangers engendrés par l'incorporation de ces matières premières.

Deux types d'informations sont à récolter afin de caractériser les matières premières qui entrent dans la composition du substrat de base :

- Les facteurs qui influencent les caractéristiques de ces produits :
 - a) La charge en pathogènes des boues est fonction de différents facteurs : le système épuratoire (technique de traitement de l'effluent), l'état sanitaire de la population (situation géographique et structures sanitaires présentes), le réseau d'assainissement (unitaire ou séparatif), les industries raccordées (rejet d'organismes spécifiques à leur activité : abattoirs ou hôpitaux) et le temps (présence ponctuelle de certains microorganismes d'origine fécale). Ainsi, il semblerait intéressant de suivre l'évolution de ces différents facteurs permettant de prévoir d'éventuelles variations des caractéristiques des boues : au minimum l'évolution de la technique épuratoire utilisée et du nombre d'industries raccordées au réseau. L'analyse des flux sortants et entrants de la station d'épuration permettrait d'infirmer ou de confirmer la teneur en contaminant [26].
 - b) La nature de l'agent structurant diffère suivant les plates-formes de compostage. Il est nécessaire de se renseigner sur la provenance de ses matériaux et la stabilité de leurs caractéristiques. La composition des déchets verts, utilisés parfois comme agent structurant, peuvent évoluer en fonction de la saison : les tontes de gazon, les élagages. Le déchet vert se dégrade différemment suivant sa nature : les déchets ligneux opposent une forte résistance au compostage.

- Les informations issues d'analyses effectuées sur le produit brut :
 - a) Les analyses des teneurs en microorganismes indicateurs de contamination fécale (Cf. 2.2.2.2) sur les boues brutes afin d'avoir une idée d'éventuels cycles de contamination au cours des saisons : des variations de la teneur des boues en microorganismes ont été enregistrées dans des zones touristiques de montagne (Com. Pers. I. DEPORTES) la concentration étant plus élevée durant les périodes de fortes fréquentations. Ces données vont permettre d'évaluer et de caler le procédé de traitement de la boue afin de permettre un abattement suffisant de la charge en microorganismes toute l'année.

Remarque : concernant l'agent structurant, ce type d'analyses n'est pas nécessaire, la contamination fécale de ces produits est négligeable en comparaison avec la contamination des boues.

- b) Les analyses physico-chimiques (c/n, siccité, structure du substrat) :

Ces paramètres sont d'une grande importance (Cf. 2.2.1.), étant donné que les caractéristiques du substrat conditionnent sa montée en température durant la phase active du compostage. Ainsi, une bonne connaissance de ces paramètres et de leur éventuelle évolution au cours de l'année doit permettre d'ajuster les proportions du mélange : agent structurant + boues

REMARQUE : dans le cadre de l'application d'une démarche HACCP, les analyses micro-biologiques réalisées en vue de valider le procédé ou les CCP, devront être effectuées par un laboratoire certifié ou de compétences reconnues.

Le fait de caractériser la matière première et en particulier la boue implique que sur les plates-formes de compostage, les boues issues de STEP différentes ne soient pas mélangées. Par la suite une gestion par lot doit être effectuée afin que la **traçabilité** de la boue et du compost soit assurée tout au long de la filière.

2. Suivi d'un lot de boues au cours du compostage – analyses sur le produit intermédiaire :

Il est possible d'effectuer un suivi de lot afin en analysant les teneurs en microorganismes marqueurs d'efficacité de traitement, afin de vérifier l'abattement en microorganismes au cours du compostage. Ce suivi de lot doit permettre de sélectionner les étapes et les points importants du procédé. Ce suivi peut aussi permettre d'effectuer un "calage" du procédé de compostage afin de définir un protocole optimal d'exploitation de la plate-forme.

3. Le produit fini :

Les caractéristiques finales du produit doivent être connues tant sur le plan agronomiques que sur le plan sanitaire ou environnemental (volume, composition, structure, teneur en microorganismes indicateurs d'hygiénisation...).

Limites et contraintes :

- Le coût des analyses.
- Pour les analyses microbiologiques, des limites existent concernant le choix des "indicateurs d'hygiénisation" et des "indicateurs de traitement" (Cf. 2.2.2). De plus, la boue et le compost sont des produits hétérogènes, ainsi, les analyses doivent être effectuées de manière à être représentatives de la concentration en pathogènes dans le tas de compost. Pour cela, l'échantillonnage peut s'effectuer selon la technique décrite dans la norme NFU44-101 (méthode des quartiers) ou dans l'Annexe I de l'arrêté du 8 décembre 1982

3.1.3 Utilisation attendue du produit [6,15,19,35,37]

Tel que définie par le *codex alimentarius*, l'HACCP permet de maîtriser le risque lié à la consommation d'une denrée alimentaire. Cette démarche implique une analyse des risques en fonction de l'utilisation qui est faite du produit. Concernant l'épandage de compost sur les terres agricoles (ou éventuellement l'utilisation de compost par des particuliers), la partie analyse des risques est complexe à effectuer (Cf. 2.1), il sera difficile de déterminer l'excès de risque lié à une concentration en microorganisme dans le compost épandu.

Afin de maîtriser au mieux le risque sanitaire lié à une utilisation du compost, l'objectif de l'HACCP sera de garantir la qualité microbiologique du compost :

- D'une part garantir l'hygiénisation du compost. Un compost hygiénisé ne doit plus contenir de microorganismes pathogène d'origines fécale, ceci étant vérifié par l'intermédiaire des indicateurs proposés dans le paragraphe 2.2.2
- D'autre part garantir la non recolonisation des tas, cette non recolonisation est fonction de la maturité du compost stocké.

Ainsi en respectant ces deux objectifs, le danger est éliminé **sous réserve de la validité de ces microorganismes indicateurs**. L'exposition n'est plus alors un facteur déterminant et le risque est maîtrisé. Une réflexion sur l'utilisation qui est faite du produit n'est dans notre cas plus nécessaire pour appliquer la démarche HACCP.

Remarque : cette démarche ne prend pas en compte les risques microbiologiques pour les employés travaillant sur le site de compostage

3.1.4 Construction du diagramme de fabrication du produit

Il s'agit d'un Audit du procédé. Le processus de fabrication est complètement décortiqué dans cette étape et chaque étape élémentaire est identifiée sous forme de diagramme.

Mode opératoire

Pour chaque étape opérationnelle, il conviendra de préciser :

- les flux d'intrants : à priori, seule l'étape correspondant au mélange des matières premières est concernée. Eventuellement, l'arrosage des tas pour augmenter le taux d'humidité du substrat : l'eau à priori n'est pas source de dangers, à moins qu'il ne s'agisse du recyclage des effluents de la plate-forme.
- Les locaux de travail :
 - la disposition et la séparation des différentes zones (arrivée des matières premières, phase active, maturation, stockage) peut présenter un risque de contamination d'un compost vieux par un compost plus jeune.
 - Ces zones sont-elles couvertes ? - Ce paramètre peut avoir une influence surtout lorsque les précipitations sont importantes, elles influencent alors le bilan hydrique du tas de compost.
 - Le revêtement au niveau de ces zones : bitume, béton, terre.... Important en vue de collecter les effluents de la plate-forme.
- nature et fonction de l'opération
- paramètres de temps et de température : les contrôles effectués au niveau des différentes étapes – des actions correctives sont-elles mises en place.

- contact du produit avec l'environnement.

Remarque : lorsqu'une démarche qualité est déjà en place sur le site, des procédures sont rédigées et présentent chacune des étapes du procédé de fabrication.

Limites et contraintes :

- Nécessite que sur le site, les différentes étapes soient facilement identifiables.

3.1.5 Confirmation du diagramme par la visite du site de compostage

Cette étape importante permet de corriger les éventuelles erreurs commises lors de la construction du diagramme ou d'éventuelles dérives commises par rapport aux informations recueillies. Il permet de faire le point sur les distorsions qui existent entre ce que l'on croit faire et ce que l'on fait réellement.

La visite de la plate-forme doit se faire dans des conditions normales de fonctionnement afin d'avoir une vision réelle du procédé de traitement.

3.1.6 Lister les dangers et les mesures préventives –étape par étape

Mode opératoire

Pour effectuer cette analyse des dangers, il est conseillé d'opérer de la sorte :

- dans un premier temps, les données scientifiques, épidémiologiques, techniques, expérimentales... relatives au problème sanitaire posé sont réunies ;
- ensuite, les dangers sont identifiés.
- enfin, pour chaque danger, le risque correspondant est évalué selon la fréquence du danger, sa probabilité d'apparition et sa gravité.

La nature du danger ciblé : le compostage des boues de station d'épuration peut présenter différents types de dangers, le but de cette étude est d'appliquer la démarche HACCP à cette filière de traitement en vue de maîtriser les risques sanitaires engendrés par les microorganismes pathogènes d'origine fécale. Deux types de dangers existent : la **survie des microorganismes** pathogènes d'origine fécale (présents initialement dans les boues) et la **contamination / colonisation du tas par des bactéries**. Pour chacun de ces dangers, il faut déterminer:

- La **Source du danger** : il s'agit d'une pratique, d'un facteur ou d'une situation responsable de l'introduction (contamination ou survie) ou de l'aggravation jusqu'à un niveau inacceptable d'un danger au cours d'une opération.
- Les **mesures préventives** sont les actions et activités qui existent ou qui doivent être mises en place pour éliminer les dangers ou réduire leur occurrence à un niveau acceptable
- Les **techniques pour recenser** les dangers doivent permettre de savoir si ce danger existe et de le quantifier.

La première étape de recherche bibliographique a permis de cerner les dangers et leur cause d'apparition, les résultats de ces recherches sont proposés ci-dessous. Le tableau suivant présente les dangers et les mesures préventives associées à chaque étape du procédé.

3 – Application de la démarche HACCP au compostage des boues de STEP

Source de dangers	Dangers associés	Mesure(s) préventive(s) / corrective(s)	Comment les recenser ?	Remarques
1. Boue de STEP ou Produit recyclé (refus de tamisage)	Présence de microorganismes pathogènes (variations saisonnières éventuelles)	Gestion de la qualité de la boue au niveau du réseau.	Prélèvement d'échantillons sur une longue période afin de déterminer d'éventuels cycles de contamination des boues Données médicales locales sur les épidémies / données sur les variations de population saisonnières (présence de touristes).	La contamination des boues dépend d'un grand nombre de facteurs. Les chiffres proposés dans la littérature sont indicatifs, il faut retenir l'ordre de grandeur [16]
2. Mélange avec l'agent structurant	Survie des microorganisme durant la phase active du à un mauvais démarrage de cette première phase du compostage : mauvaise montée en température.	Le substrat initial doit répondre aux critères qui permettront le bon compostage : C/N, Taux humidité, porosité. Pour cela, adaptation des proportions du mélange en fonction des caractéristiques des matières premières (tenir compte de l'évolution des caractéristiques au cours du temps : exemple, les caractéristiques des déchets verts sont différentes au cours de l'année avec les tontes de gazon et les élagages)	Réalisation d'analyses physico-chimiques sur le substrat après le mélange et sur les différents matériaux composant ce substrat avant le mélange.	Phase importante pour le bon déroulement du compostage, pour obtenir un compost mature et possédant des qualités agronomiques intéressantes
3. Phase active du compostage	Survie des microorganismes pathogènes car l'exposition température - temps n'est pas satisfaisante	a) Injection d'air par le biais de ventilateur : assujettissement à une sonde de température ou modifier les cycles de fonctionnement des ventilateurs b) Injection d'air en augmentant le nombre de retournements. Si la montée en température n'est pas observée, mélange avec du substrat « neuf » et retour en compostage	Effectuer des relevés de température – puis des analyses micro-biologiques (organismes indicateur de risque et de capacité de traitement) sur le compost avant maturation Contrôle de la température surtout suite à un retournement : s'assurer qu'elle remonte assez rapidement.	Etape essentielle durant laquelle le danger peut être éliminé. Mais difficile d'associer un couple T°C-Tps à un abatement
4. Déplacement du produit	Substrat non-homogène : peut favoriser la survie de microorganismes pathogènes au niveau de poches de résistance. Contamination par des microorganismes, par le matériel	a) le mélange doit permettre l'homogénéisation du substrat avant compostage. b) s'assurer que la température létale a été atteinte en chaque point du tas de compost [complexe]	a) Observation visuelle du tas de compost	Ce type d'observation est subjectif et requière un minimum d'expérience
		Ordre de déplacement (compost plus vieux puis compost plus jeune) Nettoyage du matériel utilisé pour le déplacement du produit	Observer les techniques de travail sur le site et effectuer des analyses microbiologiques (indicateurs d'hygiénisation)	Ce genre de contamination peut-il accroître de manière non négligeable les teneurs en microorganismes pathogènes ?

3 – Application de la démarche HACCP au compostage des boues de STEP

Source de dangers	Dangers associés	Mesure(s) préventive(s) / corrective(s)	Comment les recenser ?	Remarques
5. Surface des tas de compost	Survie des microorganismes pathogènes	La présence d'une couche isolante en surface du tas permet une montée en température de l'ensemble des couches du substrat.	Prélèvement d'échantillons en surface	
6. Retournement des tas	Contamination des zones saines par : - le matériel - la surface (est un réservoir de pathogènes réincorporés durant le retournement))[30]	- Cf. 4. - Zone extérieure doit se retrouver au c cœur du tas après retournement [complexe]	Prélèvement d'échantillons en surface et à c cœur suite à la réalisation d'une coupe pendant la phase de retournement. Puis analyse des échantillons afin de déterminer les teneurs en organismes indicateurs d'hygiénisation et de traitement.	Ce genre de contamination peut-il accroître de manière non négligeable les teneurs en microorganismes pathogènes ?
7. Maturation du compost (souvent stockage et maturation sont liés voir confondus au cours du compostage)	Croissance bactérienne Survie des microorganismes	S'assurer de la maturité du compost, pour cela le contrôle de l'évolution de la température paraît intéressant : une montée en température signifie une reprise de la phase active (La phase active doit être bien menée et les caractéristiques initiales du substrat doivent être favorables au compostage). Durée suffisante de la phase de maturation	Test de maturité du compost Analyses micro-biologiques en différents points du tas.	Le choix et la validité des tests de maturité du compost sont sujets à discussion
8. Criblage du compost	Contamination extérieure Dispersion des microorganismes : Contamination des zones saines par les poches de résistance Remarque : en contre partie ce phénomène permet une dilution de ces contaminants.	Eviter l'attraction des vecteurs : protection du site vis-à-vis de l'environnement extérieur – éviter les odeurs Eviter la présence de poche de résistance. Pour cela, le substrat doit être homogène et la température létale doit être atteinte en chaque point du tas.	Observation visuelle de l'état du site	
10. Le climat	Pluviométrie trop importante empêche la montée en température	Réalisation de tas plus importants lorsque le compost est situé en extérieur Réalisation de travaux de couverture du site.	Relevé de la pluviométrie chaque jour. Noter l'influence de fortes pluies sur l'évolution de la température du tas.	

Tableau 2 : tableau représentant la liste des dangers au cours du compostage.

Le tableau précédent permet d'identifier les sources des deux types de dangers, ce qui permet de dresser le bilan suivant :

1. la survie de microorganismes pathogènes est influencée par :

- Les caractéristiques physico-chimiques initiales du substrat. Lorsqu'elles ne sont pas correctes, on observe une mauvaise montée en température du substrat en début de phase active, étape importante de la destruction des agents pathogènes.
- L'aération. Lorsqu'elle n'est pas satisfaisante durant la phase active, le couple température – temps n'est pas respecté, les agents pathogènes ne sont alors pas détruits.
 - Pour un système d'aération par retournement : la périodicité des retournements doit permettre l'aération du substrat sans compromettre la montée en température et le respect du couple température-temps.
 - Pour un système d'aération forcée : lorsque la surface des tas n'est pas couverte, la température létale n'est pas atteinte dans cette zone.
- Le tas n'est pas homogène, la température létale n'est pas atteinte dans certaines zones. Ainsi, des microorganismes survivent au niveau des poches de résistances

2. Contamination / colonisation du tas par des bactéries pathogènes : afin d'éviter ce phénomène, il faut s'intéresser à l'origine des contaminations et aux facteurs qui vont par la suite permettre la croissance des bactéries :

Différentes origines pour la contamination :

1. la surface des tas (en aération par retournement) ;
2. le matériel utilisé pour le déplacement ou le retournement des tas ;
3. les vecteurs extérieurs attirés par les odeurs ;

Remarque : ces deux dernières origines demandent à être vérifiées : ce genre de contamination peut-il accroître de manière non négligeable les teneurs en microorganismes pathogènes ?

Différents facteurs favorisant la recolonisation :

1. le compost en maturation est trop humide ;
2. le compost stocké n'est pas mûr ;

La suite de la démarche en douze points a pour but de déterminer les étapes permettant l'élimination de ces dangers.

3.1.7 Déterminer les CCP (Points Critiques pour la Maîtrise du Danger)

Un CCP est une étape, un point, une procédure où un risque inacceptable peut être éliminé ou réduit. Une matière première peut également être un CCP. Pour chaque point (ou étape) il faut déterminer si celle-ci est un CCP ou non. Le but de cette étape est de vérifier que pour chaque danger, il existe un CCP.

Mode opératoire :

L'équipe détermine parmi les étapes du procédé, celles qui sont indispensables pour la sécurité sanitaire du produit. Elle peut s'aider d'un arbre de décision (Cf. Annexe 1) qu'elle utilise avec souplesse et bon sens. Cela lui permet d'examiner le processus dans son ensemble et de se poser les bonnes questions. Remarque : il est

préférable de ne pas multiplier les CCP inutilement, ce qui est préjudiciable à l'utilisation pratique et efficace du système.

Détermination des CCP du compostage :

L'identification des dangers au cours des étapes du procédé de compostage et l'utilisation de l'arbre d'analyse des points critiques présenté en annexe 1 permettent de déterminer trois points critiques (Q1 et Q2 correspondent aux questions 1 et 2 de l'ordre d'analyse des CCP) :

CCP1 : Le mélange des matières premières :

Q1 Mesures préventives : ajustement des proportions du mélange et homogénéisation du substrat

Q2 Etape destinée à éliminer un danger : le substrat obtenu doit posséder les caractéristiques nécessaires afin d'observer une montée en température (condition nécessaire pour l'élimination des germes pathogènes) au cours de la phase active. Concernant les caractéristiques du substrat, le rapport C/N (ou MO/2N) et la MS sont deux critères pertinents à prendre en compte (cependant, d'autres critères tel que le phosphore, peuvent être pris en compte en fonction des objectifs de production relatifs à la qualité agronomique du compost).

CCP2 : La phase active du compostage :

Q1 Mesures préventives : ajustement de l'aération (augmenter la ventilation ou le nombre de retournements), de la hauteur des tas, du taux d'humidité...

Q2 Etape destinée à éliminer un danger : cette étape permet d'éliminer les germes pathogènes grâce au couple température – temps. Une surveillance de la température peut s'avérer suffisante, l'ensemble des paramètres étant liés. Cependant d'autres paramètres peuvent faire l'objet d'un contrôle :

- le taux de O₂ (ou de CO₂) dans le tas : ce paramètre fournit des informations supplémentaires concernant l'oxygénation du substrat mais il est possible de discuter l'intérêt d'un tel contrôle en vue de la maîtrise du procédé de compostage;
- la matière sèche est un paramètre intéressant à surveiller lorsque le substrat a tendance à se dessécher rapidement. Il est possible d'envisager une réhumectation du tas avec toute les difficultés que cela entraîne (homogénéité du taux d'humidité);
- la hauteur de l'andain peut dans certain cas être un paramètre important à surveiller : dans les régions pluvieuses, le bilan hydrique du substrat peut se trouver modifier et des conditions anaérobies s'instaurer.

Remarques :

1. lorsque l'aération du substrat se fait par retournement périodique des andains, il faut optimiser le nombre de retournements afin de concilier aération du substrat et montée en température.

2. cette phase de contrôle de la température peut s'étendre durant la phase dite de maturation. En effet, pour certaines plates-formes, l'étape de "phase active" est de courte durée ainsi, elle se prolonge au début de l'étape de maturation.

CCP3 : Le compost mûr :

Q1 Mesures préventives : prolongation de cette phase, augmenter le nombre de retournements.

Q2 Etape destinée à éliminer un danger : le compost obtenu doit être hygiénisé et mûr afin d'éviter une recolonisation par des bactéries pathogènes (en particulier les Salmonelles [36,38]). Ainsi les paramètres pouvant faire l'objet d'un contrôle sont les suivants :

- la maturité du compost.

- la nature de l'analyse microbiologique reste à déterminer. Il est possible de se contenter des coliformes thermotolérants en routine (comme précisé dans l'Article 16 de l'Arrêté de janvier 1998) cependant, la recherche d'autres indicateurs de traitement est possible (Cf. 2.2.2)

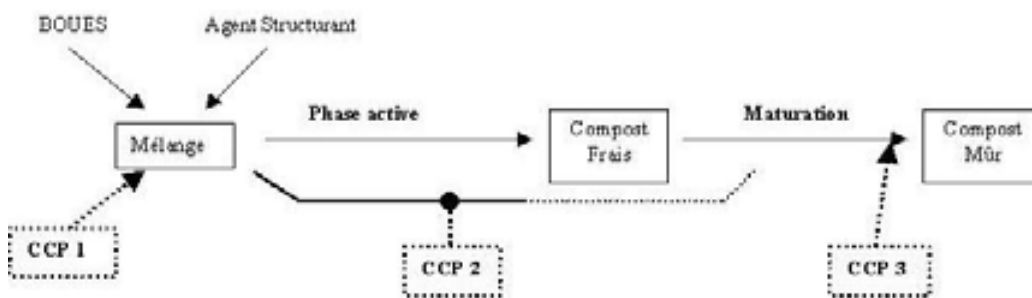


Figure 6 :
localisation des
CCP au cours du
procédé de
compostage.

3.1.8 Etablir les limites critiques aux CCP

Mode opératoire :

Afin de déterminer ces limites, il est conseillé de procéder ainsi :

- Identification pour chaque CCP des caractéristiques à surveiller
A partir des mesures préventives déterminées précédemment, on identifie les caractéristiques à surveiller, ces caractéristiques doivent être simples à observer et mesurer : température, temps...
- Définition des limites critiques pour assurer la maîtrise du CCP
Une limite critique est le seuil au-delà duquel une action corrective est déclenchée. Suivant la réactivité du système, on établit des limites critiques plus ou moins proches de la limite de qualité réglementaire. Les limites critiques doivent être choisies de telle façon que la limite réglementaire ne soit pas dépassée.
Dans le cas du compostage il s'agira de garantir le respect des seuils de concentrations concernant les filières hygiénisantes.
- Etablissement d'un seuil d'alerte à partir duquel on peut suspecter une dérive du système. La correction n'est pas obligatoire et peut se faire naturellement. Le domaine défini entre deux seuils d'alerte correspond à un domaine de variation naturelle du paramètre considéré.

3.1.9 Etablir le système de surveillance des CCP

La surveillance consiste à mettre en œuvre une série d'observations ou de mesures de paramètres de contrôle pour déterminer si un CCP est maîtrisé, et à produire des relevés précis.

Cette surveillance permet de suivre le procédé de production et de prendre les mesures qui s'imposent si une perte de maîtrise survient ou semble probable.

Mode opératoire

Pour chaque CCP, il faut préciser les exigences de surveillance et les moyens utilisés pour garantir que le CCP restera à l'intérieur des limites critiques. Deux options de surveillance existent : une surveillance directe du paramètre lorsque les conditions le permettent, ou une surveillance indirecte par la mesure d'un autre paramètre (exemple : mesure du couple température – temps afin de contrôler l'élimination des germes pathogènes durant la phase active du compostage). Cette seconde option permet d'obtenir des résultats plus rapides et plus économiques.

Il faut préciser :

- la fréquence des contrôles : la surveillance peut se faire de façon continue ou de façon discontinue. Dans le cas d'une surveillance discontinue, il faut procéder à des mesures à intervalles appropriés : la surveillance doit être suffisamment fréquente pour garantir la maîtrise du danger. Dans notre cas, le procédé de compostage se déroule sur plusieurs semaines ou mois. Suivant la phase considérée et les paramètres contrôlés, les mesures se feront à intervalles plus ou moins rapprochés.
- le nom de la personne responsable : il faut indiquer clairement qui est responsable de la surveillance, et les personnes qui ont en charge la surveillance des CCP doivent avoir appris à utiliser les procédures d'analyse et doivent comprendre parfaitement l'objet et l'importance du contrôle.
- le mode opératoire et le matériel utilisé. Ceci englobe l'ensemble des procédures concernant la vérification, le calibrage et l'étalonnage.
- le lieu de la surveillance : il doit être indiqué aussi précisément que possible
- l'objet de la surveillance
- le planning annuel d'analyses

3.1.10 Etablir un plan d'actions correctives

Etablir les actions correctives à mettre en place lorsque la perte de maîtrise est découverte. Ces mesures sont prises lorsqu'un écart est constaté, par écart on entend le non-respect des limites critiques établies.

Mode opératoire

Les procédures doivent décrire les mesures correctives acceptables à prendre en cas d'écart. Vu la variété d'écart possible à chaque CCP, il peut y avoir plus d'une mesure corrective à chaque CCP.

Deux activités sont associées aux mesures correctives :

- la détermination des **mesures immédiates**, à court terme, qu'il faut prendre concernant le produit qui pourrait avoir été touché ; Ces mesures peuvent être déterminées d'avance ou décidées selon chaque cas.
- la détermination des **mesures à prendre à long terme** pour empêcher que la situation ne se répète. Pour cela, il faut se pencher sur l'évolution du problème, déterminer la méthode qui permettra le mieux d'éliminer la source du problème (nouvelles mesures de surveillance, procédures ou limites critiques) et donner au personnel la formation nécessaire au sujet de l'origine du problème.

Le système de documentation des mesures préventives doit comprendre :

- une description du problème
- l'indication de la cause de non-conformité
- la description de la mesure corrective
- la personne responsable de l'application de la mesure corrective
- la date à laquelle l'efficacité de la mesure corrective a été vérifiée
- le nom et la signature de la personne qui a vérifié la mesure corrective
- les mesures de prévention à long terme (s'il y a lieu) qui ont été prises pour s'assurer que le problème ne se reproduira pas.

Dans le tableau suivant, les étapes 7 à 10 présentées ci-dessus, sont déterminées pour un procédé de compostage tel que défini dans la littérature.

Point Critique	Dangers	Mesure(s) préventive(s)	Limites critiques
Mélanges des matières premières	<p>Le substrat doit posséder les caractéristiques nécessaires afin d'observer une montée en température au cours de la phase active (condition nécessaire pour l'élimination des germes pathogènes).</p> <p>Par danger on entend donc : Mauvaise oxygénation / Mauvaise montée en température durant la phase active</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Suite aux analyses physico-chimiques (C/N, taux d'humidité, structure du tas) effectuées sur les boues et l'agent structurant, ajuster les proportions du mélange 2. Homogénéiser au mieux le substrat (utilisation d'un mélangeur ?) 	<p>Caractéristiques à surveiller :</p> <p>a) caractéristiques des matières premières : C/N, MS et structure. Remarque : d'autres critères peuvent être contrôlés en fonction des objectifs agronomiques fixés.</p> <p>b) homogénéité</p> <p>Les limites critiques :</p> <p>a) Les limites critiques seront à déterminer pour chacun des sites cependant, les recommandations émises dans la littérature (Cf. 2.2.1.) permettent d'obtenir un certain nombre d'indications (C/N proche de 30, taux d'humidité proche de 50%...)</p> <p>b) Dans ce cas une limite critique ne peut être déterminée de façon absolue, il s'agit d'une observation subjective et demandant une certaine expérience du compostage.</p>
Phase active du compostage	<p>Survie des microorganismes pathogènes d'origine fécale</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bonne aération des tas : retournements ou ventilation périodique². Les tas ne doivent pas excéder 3 mètres de haut. 2. S'assurer que la température létale a été atteinte en chaque point du tas : <ul style="list-style-type: none"> * Lors des retournements, la surface doit se retrouver à cœur. Les tas doivent être suffisamment gros (> 1,5 m) pour éviter que les conditions météorologiques ne perturbent le bilan hydrique. * Couvrir les tas avec de l'agent structurant (dans le cas d'une aération forcée) 	<p>Caractéristiques à surveiller :</p> <p>a) Température : la montée en température (après chaque retournement) et le couple température - temps.</p> <p>Les limites critiques :</p> <p>a) Les limites critiques seront à déterminer pour chacun des sites (ces limites sont fonction de la charge en pathogène de la boue, de la saison...) cependant, les recommandations émises dans la littérature (Cf. 2.2.2) permettent d'obtenir un certain nombre d'indications sur le couple température – temps à appliquer.</p>

² Ce paramètre varie en fonction des sites. Sur chacune des plates-formes, le nombre de retournement ou la durée de ventilation doivent être déterminés : le tas doit être suffisamment aéré pour permettre une activité microbiologique mais l'aération (en particulier forcée), ne doit pas assécher le substrat trop rapidement.

Surveillance	Mesures correctives
<p>a) Les matières premières :</p> <p>-Fréquence : a priori les caractéristiques des boues sont relativement stables pour une même STEP, analyses effectuées par le producteur de boues régulièrement. Concernant l'agent structurant, lors d'une nouvelle livraison, effectuer une analyse sur le lot (ou) éventuellement se limiter au cas où la nature de cet agent change.</p> <p>-Nom de la personne responsable : personne chargée de la réception des matières premières</p> <p>-Mode opératoire et matériel utilisé : visuel dans le cas d'un changement d'agent structurant ou analyses physico-chimiques effectuées par un laboratoire agréé.</p> <p>-Lieu de la surveillance : à l'arrivée des matières premières (zone de stockage)</p> <p>-Objet de la surveillance : ajuster par la suite les proportions du mélange.</p> <p>b) L'homogénéisation:</p> <p>-Fréquence : un contrôle doit être effectué sur chaque tas.</p> <p>-Nom de la personne responsable : personne en charge du mélange.</p> <p>-Mode opératoire et matériel utilisé : visuel.</p> <p>-Lieu de la surveillance : zone de mélange et zone de phase active.</p> <p>-Objet de la surveillance : permettre une bonne aération du compost durant la phase active du compostage.</p>	<p>a)</p> <p><i>Mesure immédiate</i> : réajustement des proportions du mélange</p> <p><i>Mesure à long terme</i> : ?</p> <p>b) <i>Mesure immédiate</i> : remélange du substrat, avant d'entamer la phase active.</p> <p><i>Mesure à long terme</i> : revoir le système de mélange / achat de nouveau matériel.</p>
<p>a) La température :</p> <p>-Fréquence : au départ de la phase active et après chaque retournement, mesure fréquente afin de vérifier l'élévation de ce paramètre (mesures journalières). Ensuite les relevés peuvent être plus espacés dans le temps. (une à deux fois par semaine)</p> <p>Remarque : durant certaines périodes peu propices (condition climatiques néfastes) des mesures plus rapprochées sont conseillées.</p> <p>-Nom de la personne responsable : personne chargée des contrôles ou des la phase active.</p> <p>-Mode opératoire et matériel utilisé : sonde de température. Il est conseillé de mesurer la température en différents points du tas (en surface et à cœur au minimum).</p> <p>-Lieu de la surveillance : zone de la phase active (et éventuellement la zone de maturation)</p> <p>-Objet de la surveillance : assurer que la température létale a été atteinte pendant une durée suffisante.</p>	<p>a) <i>Mesures immédiates</i> :</p> <p>*Mauvaise montée en température : retour à l'étape du mélange.</p> <p>*Couple température – temps non respecté :</p> <p>- envoi en maturation avec une surveillance de la température (réduction de la température est possible si la durée augmente)</p> <p>- augmenter la durée de ventilation ou le nombre de retournements</p> <p>- retour en phase de mélange pour effectuer un nouveau cycle.</p> <p><i>Mesures à long terme</i> : revoir les proportions du mélange, le nombre de retournement ou le cycle de ventilation</p>

Point Critique	Dangers	Mesure(s) préventive(s)	Limites critiques
Fin de maturation du compost	Colonisation du tas ³	Durée de la phase de maturation. (les phases précédentes ont une forte influence sur la maturation du compost)	<p>Caractéristiques à surveiller :</p> <p>a) Test de maturité du compost</p> <p>b) Analyses microbiologiques</p> <p>Limite critiques d'intervention :</p> <p>a) Les recommandations émises dans la littérature permettent d'obtenir un certain nombre d'indications</p> <p>b) Les limites critiques sont les seuils recommandés par le CSHPF.</p>

Ce tableau laisse apparaître un certain nombre de contraintes et limites :

- **Concernant les limites critiques**

Bien que le choix des paramètres à contrôler soit généralisable, les limites critiques sont à déterminer site par site, éventuellement grâce à un suivi de lot qui permet de quantifier l'abattement suite à une action sur le procédé de compostage. De plus, cette étape fait apparaître des limites au plan scientifique :

1. La notion d'abattement au cours de la phase active est difficilement maîtrisable car deux paramètres essentiels complexes à déterminer entrent en jeu : la contamination initiale des boues (hétérogénéité de la boue, coût des analyses microbiologiques, choix des indicateurs) et l'influence du couple température - temps sur la survie de l'ensemble des microorganismes pathogènes durant la phase active. Ainsi, on tentera de maximiser le traitement appliqué au substrat, en particulier le couple température – temps, afin de garantir un abattement suffisant du nombre de microorganismes. Différents auteurs proposent des couples Température –Temps (Cf. 2.2.2) suivant le procédé de compostage utilisé.

³ *La contamination du tas de compost par un agent extérieur (vecteurs de pollution) sera faible et ne représentera qu'un risque minime. Cependant, dès lors que cette contamination s'accompagne d'une croissance bactérienne (recolonisation) alors, un risque important peut apparaître. C'est pourquoi au niveau de ce CCP on cherche à essentiellement à limiter la recolonisation des tas sans se soucier des sources de contamination éventuelles.*

Surveillance	Mesures correctives
<p>a) Le test de maturité -Fréquence : avant départ du compost -Nom de la personne responsable : personne en charge de la commercialisation -Mode opératoire et le matériel utilisé : Différents tests existent. -Lieu de la surveillance : zone de maturation / stockage -Objet de la surveillance : s'assurer de la maturité du compost, facteur négatif de recolonisation par les bactéries.</p> <p>b) Analyses microbiologiques -Fréquence : avant départ du compost -Nom de la personne responsable : personne en charge de la commercialisation -Mode opératoire et le matériel utilisé : analyse des concentration en <i>Salmonella</i>, entérovirus, œufs d'Helminthes, coliformes fécaux et <i>Clostridium perfringens</i>. -Lieu de la surveillance : zone de maturation / stockage -Objet de la surveillance : s'assurer de l'hygiénisation du compost.</p>	<p>a) <i>Mesures immédiates</i> : Augmenter la durée de maturation</p> <p><i>Mesures à long terme</i> : Modifier le durée de la phase de maturation du compost.</p> <p>b) <i>Mesure immédiate</i> Augmenter la durée de la phase de maturation.</p> <p><i>Mesures à long terme</i> : Modifier la durée de la phase de maturation ou de la phase active.</p>

2. Les tests de maturité sur le compost : d'une part, l'éventail des méthodes offert est vaste et le choix de l'une d'elles dépendra des objectifs agronomiques fixés. Il existe des méthodes fondées sur le suivi de l'évolution des critères biologiques, des méthodes basées sur la caractérisation de la matière organique du compost et des méthodes basées sur des essais directs sur les végétaux (test de germination ou de phytotoxicité) [27] ; d'autre part, la maturité du compost est complexe à estimer, tous les tests proposés dans la littérature ne sont pas fiables [27] ; enfin, il faut s'assurer que le degré de maturité obtenu permette de prévenir d'une recolonisation du compost par des bactéries telles que les salmonelles.

3. L'homogénéité du substrat est complexe à juger.

• **Les actions correctives**

Le compostage est un procédé qui possède deux caractéristiques fondamentales : **stabilité** et **inertie** [25]. Ainsi ce système est facile à déclencher et à entretenir mais il est plus difficile à orienter et à corriger quand cela s'avère nécessaire. Ainsi, une mesure corrective sera difficile à déclencher (hormis un retour en début de compostage), la réponse ne sera pas immédiate.

Le choix des mesures correctives proposées dans le tableau ci-dessus est généralisable dans une certaine mesure, ces actions devront être réfléchies et adaptées à chaque site. En particulier, il est important de considérer la durée des différentes étapes du procédé de compostage : lorsque la phase active est courte, la dégradation de la matière organique (qui s'accompagne d'une élévation de la température) peut se prolonger durant la phase de maturation. Dans ce cas, le contrôle de la température devra se prolonger durant la phase de maturation. De plus, une élévation de la température durant la maturation n'aura alors pas la même signification et les mêmes répercussions.

3.1.11 Vérifier le système [31,33]

Cette étape permet de prouver que le plan HACCP mis en place fonctionne correctement.

Mode opératoire

L'équipe met en place des procédures de vérification : des tests, des inspections ou des audits.

La fréquence de telles procédures doit suffire pour valider le système. La vérification comporte cinq activités principales :

1. La validation des limites critiques des CCP ;
2. La vérification initiale du plan HACCP.

Ces deux premières activités doivent être accomplies avant la mise en œuvre ou le début de l'exploitation du système HACCP.

3. La vérification en routine des CCP ;
4. La vérification ou la validation des changements apportés aux contrôles ou aux limites critiques des CCP ;
5. Les vérifications annuelles afin de s'assurer que le système HACCP est toujours approprié :
 - l'assurance que tous les contrôles nécessaires sont en place par rapport à ce qui est écrit
 - l'examen des registres d'enregistrements ;
 - l'examen des mesures correctives ;
 - l'examen de l'étalonnage des appareils ;
 - la vérification ou la validation des changements apportés aux plans HACCP.

Les modalités de vérification doivent être formalisées et prévoir des dispositions d'enregistrement des résultats. Ces vérifications doivent viser et conduire à une amélioration du système.

Limites et contraintes

- En tant que système d'assurance de la sécurité sanitaire, l'HACCP se doit d'établir un système d'auto-vérification. Cependant, ce point demande un investissement important de l'équipe HACCP qui doit rédiger et faire respecter les différentes procédures.
- Il est nécessaire que l'équipe HACCP se tienne au courant des dernières innovations, il faut instaurer une veille scientifique et technique afin de pouvoir modifier, les paramètres contrôlés au niveau des CCP, les limites critiques ou les mesures correctives mises en œuvre.

3.1.12 Etablir une documentation [31,33]

L'objectif de ce système documentaire est de constituer un manuel regroupant l'ensemble des données utiles relatives au plan HACCP :

- Les données liées aux programmes préalables :
 - le plan du bâtiment, les diagrammes de flux ;
 - les programmes d'entretien des équipements ;
 - les consignes relatives au personnel et à leur formation ;
 - les spécifications des matières premières : leurs caractéristiques et les facteurs influençant celles-ci ;
- Les données permettant d'identifier l'organisation de l'entreprise.

- Le plan HACCP, ainsi que les procédures et instructions de travail afférentes. Cette partie permet d'identifier le système mis en place : les procédures, les modes opératoires, les instructions de travail et les documents relatifs aux étapes 1 à 11 ;
- Les enregistrements sont un élément essentiel du système HACCP, car ils constituent une preuve objective de l'application permanente et de l'efficacité du système. Cette partie du dossier HACCP doit contenir l'ensemble de l'information concernant tous les enregistrements effectués à chaque CCP et contient les renseignements dont on a besoin pour s'assurer que le plan HACCP est respecté. Les résultats des contrôles, des écarts et de toute mesure corrective effectuée y sont consignés.
- La documentation relative aux formations suivies, textes de loi...

L'Annexe 4 présente le plan d'un manuel de base est inspiré du guide pour l'application de l'HACCP dans les PME [31].

3.1.13 Conclusion

L'HACCP semble applicable en théorie au procédé de compostage des boues de STEP, cependant un certain nombre de limites et de contraintes sont identifiées. En outre, le déroulement du plan de travail de l'HACCP a permis de lister les dangers, puis d'identifier trois points critiques au cours du compostage (Cf. Figure 7) et une liste de moyens à mettre en œuvre afin de maîtriser le risque sanitaire microbiologique d'origine fécale. Suite à cette approche théorique, la visite de plates-formes de compostage doit permettre de comparer cette liste de recommandations avec la réalité du terrain.

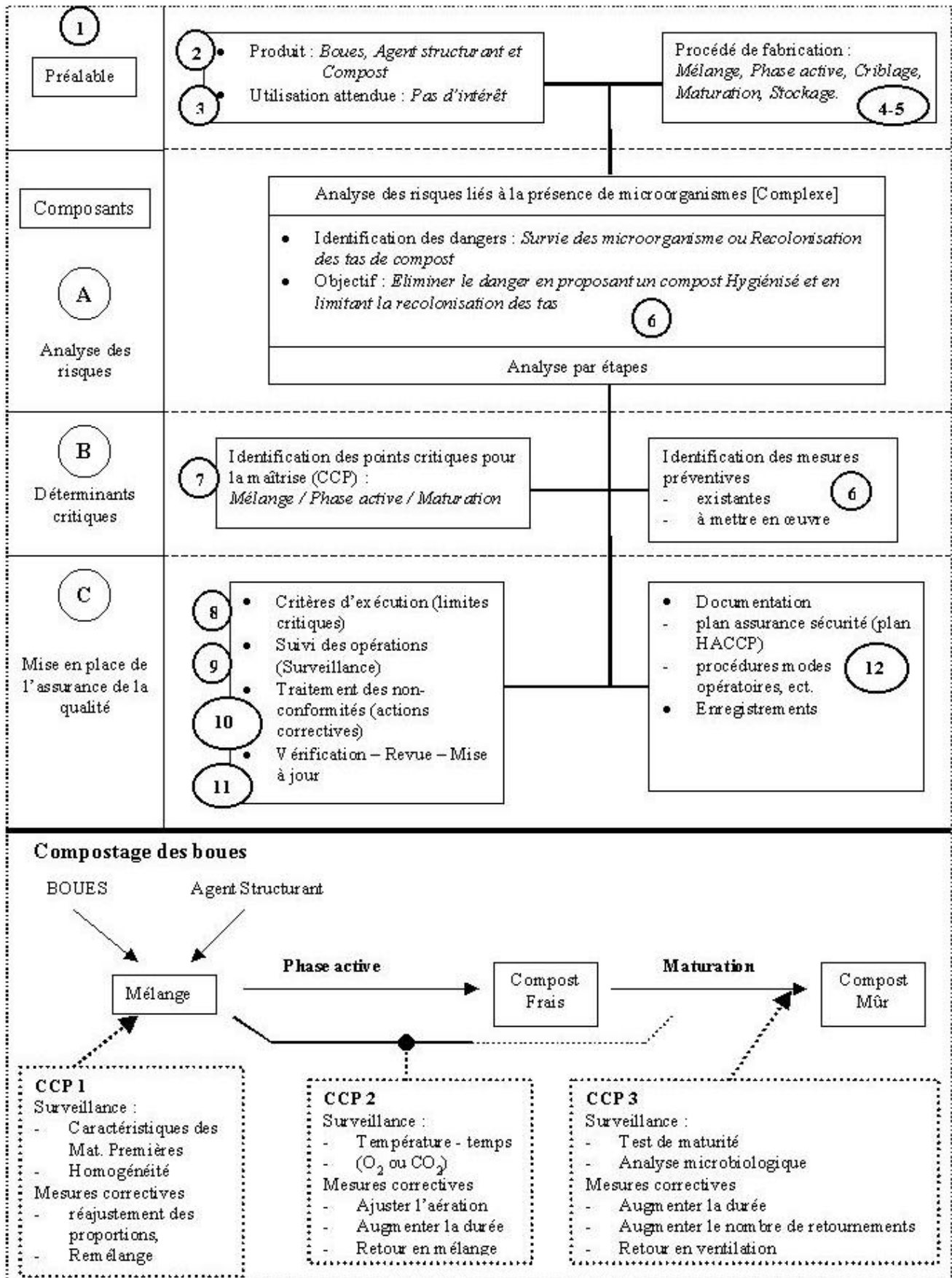


Figure 7 : schéma d'application de l'HACCP au compostage des boues de STEP.

3.2 APPLICABILITE DE L'HACCP SUR DIFFERENTS SITES DE COMPOSTAGE

Cette seconde partie, qui fait suite à la visite de cinq plates-formes de compostage, doit permettre d'évaluer dans quelles mesures la démarche HACCP est applicable à la réalité du terrain. Dans cette partie, la réflexion concernant la maîtrise du procédé de compostage ne permet pas de juger la qualité du compost actuellement produit mais d'évaluer les pré-requis et les mesures nécessaires en vue de l'application de l'HACCP : cette partie doit permettre à l'ADEME et/ou aux plates-formes intéressées par cette démarche de juger à travers quelques exemples des contraintes que l'application de l'HACCP peut impliquer.

Pour chacune des plates-formes, le procédé de compostage est décrit à l'aide d'un schéma. Ceci permet de constater les mesures actuellement en place et permettant de maîtriser le procédé. Ensuite, les mesures existantes sur chacun des sites sont comparées aux recommandations émises dans la partie précédente (plan de travail en 12 points). Pour chacune des plates-formes, un bilan est effectué. Il englobe les points positifs et les contraintes induites par l'application de la démarche HACCP. Enfin, cette étude permet d'évaluer les pré-requis nécessaires en vue de l'application de l'HACCP.

Les sites visités se différencient dans leur procédé :

1. Par le choix du mode d'aération des tas en phase active : aération par retournement des tas de manière régulière et plus ou moins contrôlée ou aération des tas par circulation forcée d'air dans la masse par aspiration ou par ventilation à l'aide de ventilateurs.
2. Par le choix de l'agent structurant

Les cinq sites visités sont présentés dans les paragraphes suivants en débutant par les trois plates-formes sur lesquelles l'aération du substrat s'effectue par retournement des andains.

3.2.1 Description des plates-formes :

3.2.1.1 Site A:

Cette plate-forme traite les 600 tonnes de boues produites annuellement par la STEP de X. Cela représente environ 1500 tonnes de compost produit par an.

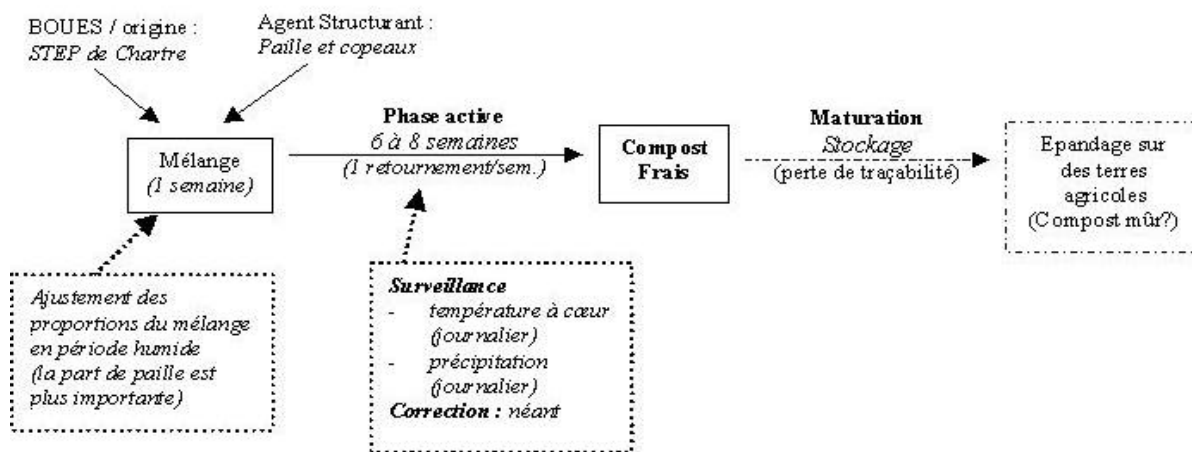


Figure 8 : schéma du procédé de compostage du site A.

	Existant	A mettre en œuvre
Description du produit	- Nature et fréquence des analyses imposées au producteur de boues par la réglementation : la valeur agronomique des boues, les éléments traces métalliques et les composés organiques - Etude menée sur l'agent structurant, permettant d'en connaître les caractéristiques.	- Analyses microbiologiques des boues (pour la mise en place de la démarche) et du compost avant épandage
Traçabilité	La traçabilité de la boue est assurée pendant la phase active (perte de traçabilité en maturation)	- Assurer la traçabilité jusqu'à l'épandage : bétonner la zone de stockage et effectuer une gestion par lot
Surveillance	Température et pluviométrie pendant la phase active	(Taux d'O ₂ ou de CO ₂) - analyses microbiologiques du compost avant épandage - test de maturité du compost
Mesures préventives	Ajustement des proportions du mélange durant les périodes humides	- Ajuster les proportions du mélange en fonction des caractéristiques des matières premières (- Vis à vis de la pluie : couverture de la zone de compostage actif)
Mesures correctives		- Augmenter le nombre de retournements et prolonger la phase active. - Retour en début de cycle lorsque le couple température – temps fixé n'est pas respecté ou que les analyses microbiologiques du compost sont mauvaises.

Contraintes :

- La durée du compostage paraît un peu courte : la phase de maturation est quasi inexistante pour certains lots traités en fin de cycle car les composts sont évacués mi-juillet quel que soit le temps de stockage (de mi-juillet à mi-octobre les boues sont épandues sans traitement préalable sur les terres agricoles). Ceci nécessite de mettre en place une plate-forme de maturation sur laquelle une gestion par lot serait effectuée. Ce qui représente des contraintes financières importantes.

- Sur ce site la pluviométrie pose un problème important. La hauteur des tas est faible (< 1.5m, conséquence du système de retournement à l'aide d'une andainseuse) et amplifie ainsi l'influence de la pluie sur le bilan hydrique des andains. Ceci limite la montée en température des andains.

Points positifs :

- Ce site met en œuvre un certain nombre de moyens permettant la maîtrise du procédé de compostage (suivi de la température et de la pluviométrie). Cependant, des actions correctives sont à définir et à mettre en place

- Les matières premières sont de nature relativement stable (les boues proviennent d'une seule STEP, la nature de l'agent structurant est constante) ceci permet donc de limiter les analyses à effectuer et de faciliter la gestion par lot de boues.

Remarque :

L'objectif de ce site n'est pas l'hygiénisation, le compostage est surtout un moyen de stabilisation de la boue. Le produit obtenu est épandu en grandes cultures, l'hygiénisation n'est donc pas un pré-requis. De plus peu de compost est produit sur ce site au regard des autres plates-formes.

3.2.1.2 Site B:

Ce site traite 15000 tonnes des boues provenant d'IAA et de STEP sont traitées chaque année.

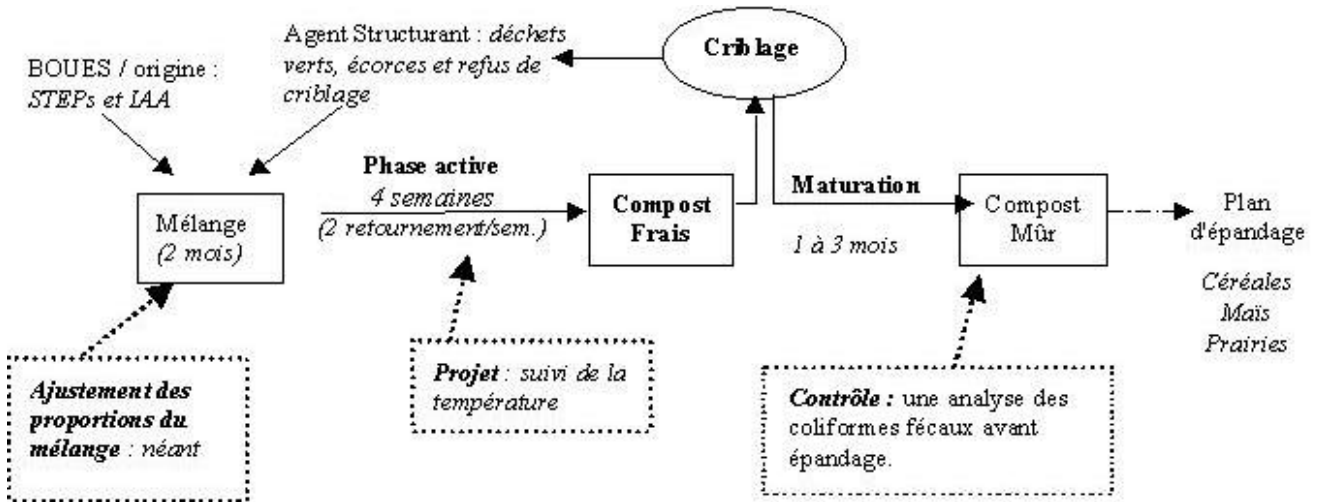


Figure 9 : schéma du procédé de compostage du site de B.

	Existant	A mettre en œuvre
Description du produit	<ul style="list-style-type: none"> - Analyses imposées au producteur de boues par la réglementation : la valeur agronomique des boues, les éléments traces métalliques et les composés organiques - Analyse coliformes fécaux sur compost avant épandage 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyses microbiologiques des boues (pour la mise en place de la démarche) et du compost avant épandage - Analyses physico-chimique des agents structurant
Traçabilité	<ul style="list-style-type: none"> - Perte de traçabilité dès l'arrivée des boues 	<ul style="list-style-type: none"> - Assurer la traçabilité jusqu'à l'épandage : nécessite une augmentation de la surface bétonnée(?) puis une gestion par lot.
Surveillance		<ul style="list-style-type: none"> - Température et pluviométrie (Taux d'O₂ ou de CO₂) - test de maturité du compost - analyses microbiologiques avant épandage du compost
Mesures préventives		<ul style="list-style-type: none"> - Ajuster les proportions du mélange en fonction des caractéristiques des matières premières (- Vis à vis de la pluie : couverture de la zone de compostage actif)
Mesures correctives		<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter le nombre de retournements - Retour en début de cycle lorsque le couple température – temps fixé n'est pas respecté ou que les analyses microbiologique du compost sont mauvaises.

Contraintes :

- Ce site doit mettre en place un certain nombre de mesures concernant la surveillance et la correction du procédé de compostage.
- Les boues traitées possèdent différentes origines. Ainsi, une gestion par lot de boue nécessite une surface importante pour permettre le stockage des boues suivant leur origine avant leur mélange à l'agent structurant. Cet aspect représente des contraintes techniques et financières supplémentaires.

- La plate-forme n'est pas couverte. Une mesure de la température pourrait présenter un intérêt afin de vérifier si ce facteur a une influence sur la phase active de compostage.
- La première phase de mélange (ou "pré-compostage") dure deux mois. Les matières premières arrivant sur le site sont insérées à ce tas. Ainsi, tout le substrat ne reste pas deux mois en phase de pré-compostage.

Points positifs :

- la durée du compostage sur le site est suffisamment longue, dès lors que les boues ont subi une phase de "pré compostage" de deux mois.
- les sociétés cogérant le site envisagent de mettre en place un système de surveillance de la température au cours du cycle de compostage.

3.2.1.3 Site C :

Chaque année, 8000 tonnes de boues sont compostées sur ce site.

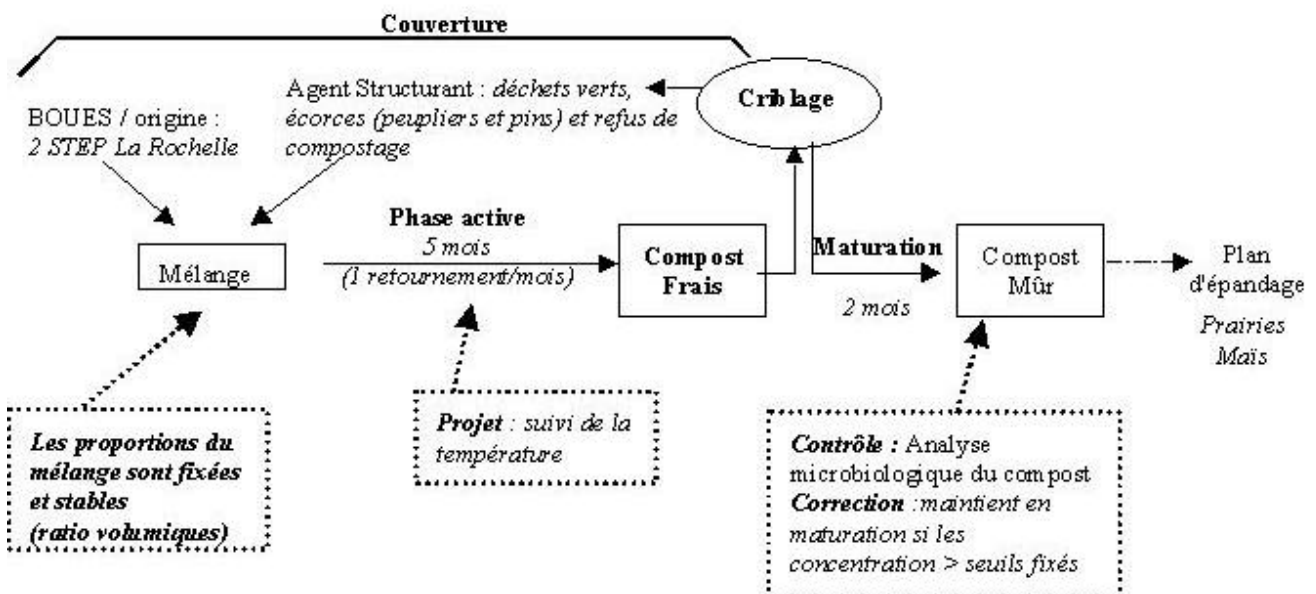


Figure 10 : schéma du procédé de compostage du site C

	Existant	A mettre en œuvre
Description du produit	<ul style="list-style-type: none"> - Analyses imposées au producteur de boues par la réglementation : la valeur agronomique des boues, les éléments traces métalliques et les composés organiques - Analyses (<i>Salmonelles, entérovirus, œufs d'helminthes, coliformes thermotolérants et clostridium perfringens</i>) sur compost avant épandage 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyses microbiologiques des boues (pour la mise en place de la démarche) - Analyses physico-chimique des agents structurant
Traçabilité	<ul style="list-style-type: none"> - Perte de traçabilité entre les boues des deux STEP dès l'arrivée des boues. Ensuite, la gestion s'effectue par lot de compost. 	<ul style="list-style-type: none"> - Assurer la gestion par lot de boues et pas simplement par lot de compost
Surveillance	<ul style="list-style-type: none"> - Tests de phytotoxicité : cresson et orge et tests de germination des adventices 	<ul style="list-style-type: none"> - Température et pluviométrie (Taux d'O₂ ou de CO₂) - analyses microbiologiques du compost - test de maturité du compost
Mesures préventives		<ul style="list-style-type: none"> - Ajuster les proportions du mélange en fonction des caractéristiques des matières premières (- couverture de la zone de maturation)
Mesures correctives	<ul style="list-style-type: none"> Si le compost n'est pas hygiénisé, il est maintenu en maturation, une autre analyse est effectuée par la suite. 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter le nombre de retournements - Retour en début de cycle lorsque le couple température – temps fixé n'est pas respecté ou que les analyses microbiologique du compost sont mauvaises.

Contraintes :

- Aucune mesure de surveillance ou préventive n'est mise en place sur le site. L'application de l'HACCP demandera un investissement tant financier qu'humain important afin de "caler" le procédé de compostage et de mettre en place les moyens nécessaires à la surveillance et à la prévention spécifiés dans le plan de travail de l'HACCP.

- le nombre de retournements pendant la phase active paraît peu élevé ce qui ne permet pas une bonne aération du substrat.

- au coût de traitement s'ajoute le transport car La Rochelle se situe à 70 Km de la plate-forme. De plus, les boues sont valorisées à proximité de cette agglomération.

Points positifs :

- Le compost fait l'objet d'un contrôle par le gestionnaire et la chambre d'agriculture. Ainsi, le compost épandu est hygiénisé. Mais, les refus sont importants, une maîtrise plus en amont du procédé permettrait d'éviter un nombre conséquent d'analyses microbiologiques et d'abaisser le taux de refus.

- Les boues proviennent des deux STEP de La Rochelle, ainsi une gestion par lot de boues paraît réalisable sans trop de contraintes (en particulier la surface disponible sur le site est suffisante).

- une grande partie du site est couvert, ce qui permet d'éviter l'influence de la pluie et de maîtriser plus aisément les paramètres permettant la production d'un compost de qualité.

3.2.1.4 Site D :

Ce site traite 10000 m³ de boues par an (sur ce site et 5 à 6000 m³ sur un site voisin). Les boues compostées proviennent de trois STEP du département.

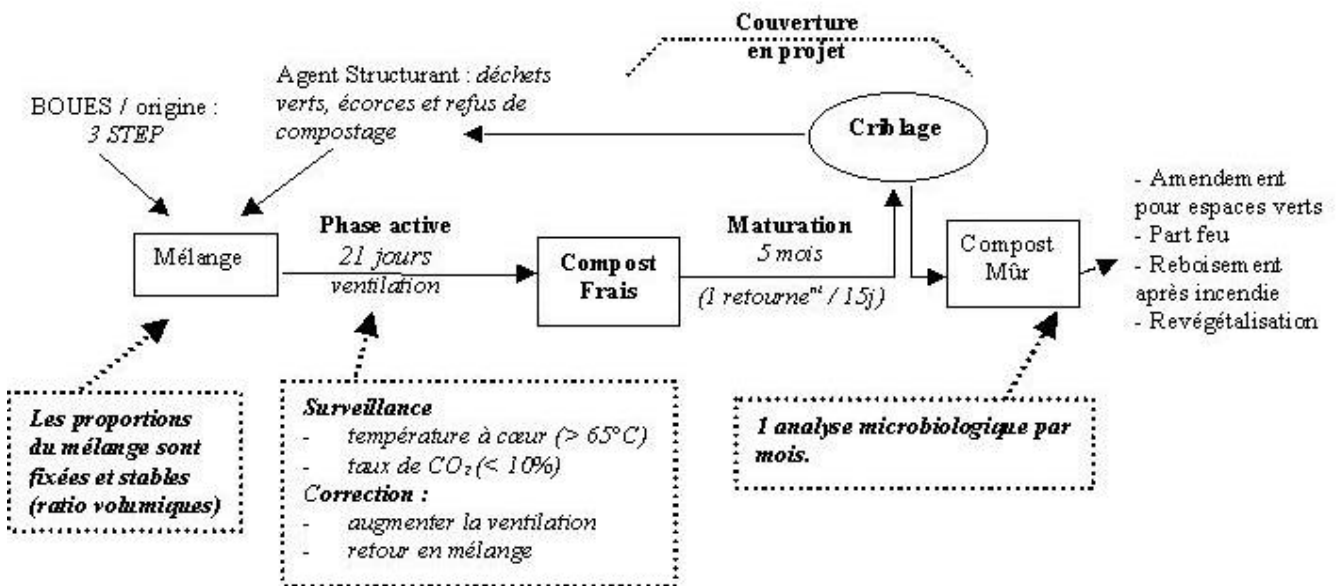


Figure 11 : schéma du procédé de compostage du site D.

	Existant	A mettre en œuvre
Description du produit	<ul style="list-style-type: none"> - Analyses imposées au producteur de boues par la réglementation : la valeur agronomique des boues, les éléments traces métalliques et les composés organiques - Analyses (<i>Salmonelles, entérocoques, œufs d'helminthes viables, coliformes, Escherichia coli et Clostridium perfringens</i>) sur compost avant épandage, une fois par mois 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyses microbiologiques des boues (pour la mise en place de la démarche) - Analyses physico-chimique des agents structurant
Traçabilité	<ul style="list-style-type: none"> - Perte de traçabilité dès l'arrivée des boues - Projet : gestion par lot de boues 	<ul style="list-style-type: none"> - Assurer la traçabilité des boues jusqu'à l'épandage.
Surveillance	<ul style="list-style-type: none"> - Température - Taux de CO₂ - Test de toxicité du compost effectué : test cresson 	
Mesures préventives		<ul style="list-style-type: none"> - Ajuster les proportions du mélange en fonction des caractéristiques des matières premières
Mesures correctives	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la ventilation Retour en mélange 	

Contraintes :

- durant la phase active de compostage, envisager de recouvrir le tas d'une couche isolante afin de permettre une montée en température en chaque point du substrat et éviter lors du déplacement du tas de contaminer les zones saine par les microorganismes pathogènes de la surface.
- Les boues proviennent de trois STEP différentes et le suivi par lot de boues n'est pas assuré. Afin d'y remédier, il faut envisager une zone de stockage des boues selon leur origine afin de constituer des substrats pour les quels les boues proviennent d'un seul site. Ceci est à l'origine de contraintes techniques et financières supplémentaires.
- Le climat de la région (chaud et venteux) entraîne un assèchement rapide des tas qui favorise la formation de poussières transportées par le vent.

Points positifs :

- Ce site met en œuvre un certain nombre de moyens permettant la maîtrise du procédé de compostage (suivi de la température et du taux de CO₂ au cœur du tas). Cependant, des actions correctives sont à définir et à mettre en place
- le site est en cour de réaménagement (couverture du site, gestion par lot de boues, assujettissement température/ventilation...)

3.2.1.5 Site E :

Le site E traite les boues de différentes STEP des quatre départements limitrophes. Chaque année, environ 13000 tonnes de boues sont compostées.

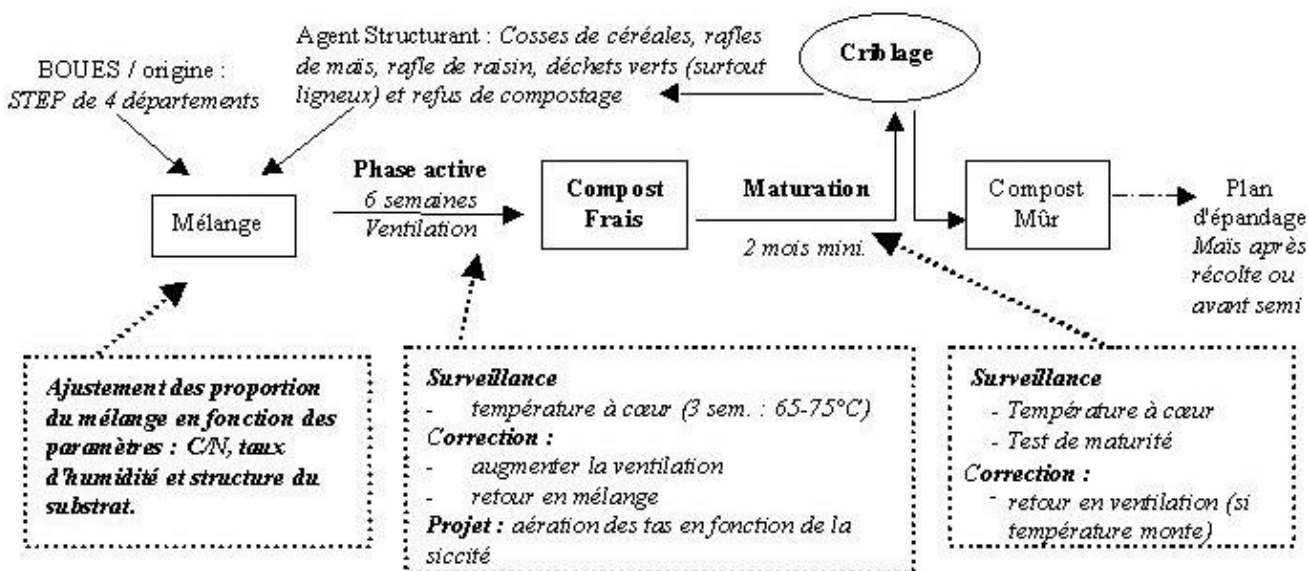


Figure 12 : schéma du procédé de compostage du site E.

	Existant	A mettre en œuvre
Description du produit	<ul style="list-style-type: none"> - Analyses imposées au producteur de boues par la réglementation : la valeur agronomique des boues, les éléments traces métalliques et les composés organiques - Analyse physico-chimique sur l'agent structurant à chaque arrivage. 	- Analyses microbiologiques des boues (pour la mise en place de la démarche) et du compost avant épandage.
Traçabilité	- Traçabilité et gestion par lot de boues jusqu'à l'épandage	
Surveillance	<ul style="list-style-type: none"> - Température - Test de germination ou test de maturité 	-Taux de CO ₂
Mesures préventives	- Ajustement des proportions du mélange en fonction des caractéristiques des matières premières	
Mesures correctives	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la ventilation - Retour en mélange 	

Points positifs :

- Ce site met en œuvre un certain nombre de moyens nécessaires permettant la maîtrise du procédé de compostage. Ce site a été créé par une coopérative agricole afin de fournir aux agriculteurs de la matière organique stabilisée présentant des critères agronomiques intéressants (composition physico-chimique). Un ingénieur a été chargé de concevoir le site de manière à produire un compost de qualité (au plan agronomique), ainsi un nombre de moyens importants est mis en œuvre afin de permettre une maîtrise du procédé sur ce site.

3.2.1.6 Campagne d'échantillonnage :

Des analyses de compost sont effectuées sur les sites E et A. Cette campagne d'analyses, présentée plus en détail dans l'annexe 5 ne permet pas de conclure quant à la capacité hygiénisante des deux procédés testés : les teneurs initiales des boues en microorganismes pathogènes ne sont pas connues et aucun indicateur d'hygiénisation n'est détecté. L'obtention de résultats négatifs : compost non-hygiénisé, aurait éventuellement permis de remettre en cause certaines étapes du procédé de compostage.

Cette campagne démontre cependant l'intérêt d'effectuer le suivi microbiologique d'un lot de boue tout au long du compostage, afin de pouvoir estimer l'abattement en microorganismes au cours des différentes étapes du procédé.

3.2.2 Bilan:

Cette partie permet de définir une liste de pré-requis (les points **A** à **E**) nécessaires en vue de l'application de l'HACCP sur une plate-forme de compostage des boues de STEP.

Avant tout, la mise en place d'une telle démarche représente un investissement financier important. Ainsi, les plates-formes concernées par une telle application doivent traiter une quantité assez importante de boues.

Les différentes étapes de l'HACCP sont présentées ci-dessous afin de laisser apparaître les points importants et les pré-requis nécessaires à l'application d'une telle démarche.

1) **Le préalable** (formation d'une équipe, description du produit, de son utilisation et du procédé de fabrication) et la constitution d'une équipe nécessite des moyens humains et financiers importants.

Les visites des sites ont mis en avant des disparités concernant la maîtrise du procédé de traitement. Les moyens mis en place sont fonctions du personnel disponible sur le site (en particulier la présence d'un ingénieur ou technicien en permanence sur la plate-forme conditionne la possibilité de gérer correctement le procédé de traitement de la boue) et des objectifs fixés par le gérant de la plate-forme. Ainsi, la mise en place de cette démarche paraît faisable dès lors que **A** Le gérant et le personnel du site se sentent concernés et motivés par l'application de l'HACCP.

B La nature et les caractéristiques des matières premières doivent être connues afin d'ajuster les proportions du mélange. En effet la composition initiale du substrat conditionne le bon déroulement du compostage par la suite. Ainsi, la description du produit nécessite un certain nombre d'analyses : les analyses actuellement effectuées sur les sites de manière systématiques sont les analyses imposées au producteur de boues par la réglementation : leur nature (la valeur agronomique des boues, les éléments-traces métalliques et les composés organiques) et leur fréquence (fonction de la quantité de matière sèche épandue) sont précisées dans l'article 14 de l'arrêté du 8 janvier 1998. Dans la plupart des cas, les exploitants des sites de compostage se limitent à ces analyses. Ainsi les critères microbiologiques ne sont pas suivis. Les analyses qui doivent être réalisées sur la boues afin de vérifier l'existence de cycles de contamination demande de l'argent et du temps (mise en place d'un plan d'échantillonnage au cours du compostage).

Dans ce préalable intervient la notion de traçabilité des boues. D'une part, pour les plates-formes traitant les boues de différentes STEP, une gestion par lot de boues doit être effectuée. D'autre part, une fois le substrat mélangé, un suivi doit se faire tout au long du compostage. **C** Une gestion par lot de boues doit être effectuée afin de pouvoir assurer la traçabilité du compost. Cet aspect est d'autant plus contraignant que les boues proviennent de STEP différentes, la surface des plates-formes de compostage doivent être adaptée et pouvoir assurer le stockage des boues en fonction de leur provenance ;

2) **L'identification des dangers et l'évaluation des risques** ; cette étape est généralisable à tous les sites. Les objectifs de qualité sanitaire microbiologique sont les mêmes pour chacun des sites (qui souhaite appliquer la démarche) : le compost doit être hygiénisé et ne pas permettre la recolonisation par des bactéries pathogènes. L'ensemble des dangers sont répertoriés dans la partie précédente et s'appliquent aux différentes plates-formes visitées

3) **Le choix des déterminants critiques** :

- Les **CCP** proposés dans la première partie nécessite d'être validés sur les sites, des modifications pouvant éventuellement être faites en fonction du procédé suivi.
- Les **mesures préventives** : cette étape est une source de contraintes pour les différents sites. En effet dès lors qu'une mesure n'est pas en place, la plate-forme concernée doit y remédier : dans la littérature, des diagrammes sont proposés pour déterminer la nature des CCP (Cf. Annexe 1). Parmi les premières questions : "si des mesures préventives ne peuvent être mises en place, vous devez modifier l'étape, la procédure ou le produit". **D** Les actions préventives et correctives envisagées (augmentation de la durée de certaines phases, retour du substrat en début de cycle) ne doivent pas être compromises pour des raisons techniques (manque de places ou de temps) ou financières.

4) **La mise en place de l'assurance qualité :**

- La détermination des limites critiques, des moyens de contrôle et des actions correctives s'effectue site par site, cependant, les recommandations émises dans la partie précédente représentent une aide intéressante. La faisabilité sur les sites dépend des moyens déjà mis en œuvre dans le cadre de la surveillance et de la prévention d'anomalies constatées. **E** Le procédé de compostage doit faire l'objet d'une surveillance minimale : la température du substrat doit être suivie tout au long de la phase active (qui peut s'étendre dans certains cas pendant la phase dite de maturation).
- La mise en place d'un système documentaire implique une certaine disponibilité de la part de la personne chargée de cette tâche.

5) **la vérification** des activités précédentes sera effectuée en interne ou par l'intermédiaire d'un organisme certificateur. La participation d'un organisme extérieur est une source de frais supplémentaire mais assure une transparence de l'assurance qualité.

4 - DISCUSSION

4.1 FAISABILITE

Le plan de travail en douze points paraît applicable au procédé de compostage des boues de STEP. Cette démarche qui fait intervenir l'ensemble des employés, doit être motivée par le gérant de la plate-forme. Il doit se fixer au préalable un objectif à atteindre en terme de qualité sanitaire du produit (à priori, les objectifs de qualité doivent se rapprocher au maximum d'un compost hygiénisé tel que défini par la réglementation en vigueur). Cependant, l'application d'une telle démarche ne doit pas jouer en la défaveur des autres critères de qualité du compost produit. Le compost épandu sur les terres agricoles est avant tout une matière fertilisante. Ainsi, le compost en sortie de plate-forme doit répondre à des exigences agronomiques qui concernent sa maturité et sa composition (caractéristiques agronomiques).

En outre, l'application d'une telle démarche laisse apparaître un certain nombre de contraintes humaines et financières :

- l'achat de matériel de contrôle de la température ou d'autres paramètres représente un coût non négligeable ;
- les experts externes et formateurs impliqués dans la mise en place de la démarche ainsi que les analyses microbiologiques nécessitent une somme d'argent importante.
- la disponibilité de l'équipe HACCP et la motivation des employés et surtout du personnel encadrant.

D'autre part, cette étude laisse apparaître des limites d'ordre scientifique qui amènent à un certain nombre de réserves :

1. Un compost est considéré comme hygiénisé dès lors que la concentration en microorganismes indicateurs n'excède pas les seuils fixés par le CSHPF. Ceci fait intervenir la notion d'indicateur d'hygiénisation qui est largement discutée dans la littérature (Cf. 2.2.2).

2. Concernant les analyses microbiologiques effectuées sur les boues ou le compost :

- ces deux composés sont hétérogènes, ainsi le prélèvement doit être effectué de manière à avoir un échantillon représentatif du tas analysé ;
- les microorganismes analysés doivent être judicieusement choisis : il faut considérer des indicateurs de risque (microorganismes pathogènes tels que Salmonella, les entérovirus et les œufs d'helminthes) d'origine fécale et des indicateurs de procédé de traitement (*Clostridium perfringens*, Coliformes thermotolérants)
- l'incidence d'un couple température-temps sur la réduction de la charge en microorganismes pathogènes est délicat à estimer. Il est donc complexe d'assurer qu'en appliquant une certaine température au substrat, la teneur en agents pathogènes n'excédera pas les seuils fixés. Il faudra donc maximiser le couple température–temps afin d'assurer une hygiénisation du compost.

3. Enfin, l'inertie et la stabilité du procédé de compostage limitent considérablement les mesures correctives qui peuvent être prises. En effet, lorsqu'une mesure de la sorte est prise, le temps de réponse étant long, la durée du compostage et les coûts augmentent.

Remarque : les sites sur lesquels l'oxygénation du substrat s'effectue en continue par aération forcée sont plus à même de maîtriser le procédé de compostage.

La visite de cinq plates-formes de compostage a permis de mettre en avant un certain nombre de pré-requis nécessaires dès lors qu'un site souhaite mettre en place une démarche HACCP.

- A. le gérant et le responsable de la plate-forme de compostage doivent se sentir concernés et motivés par l'application d'une telle démarche sans quoi cela risque d'être un échec : l'échantillonnage de compost sur le site B n'a pas été effectué correctement (l'andain échantillonné était trop jeune) à cause du manque de motivation et de communication avec le gérant de la plate-forme ;
- B. la nature et les caractéristiques des matières premières doivent être connues afin d'ajuster les proportions du mélange ;
- C. une gestion par lot de boue ainsi qu'une traçabilité tout au long de la filière doivent être assurées ;
- D. les actions préventives et correctives envisagées ne doivent en aucun cas être compromises pour des raisons techniques ou financières ;
- E. le procédé de compostage doit faire l'objet d'une surveillance minimale : la température doit être suivie tout au long de la phase active ;

4.2 INTERET D'APPLIQUER UNE TELLE DEMARCHE

L'application d'une telle démarche présente tout d'abord un intérêt d'ordre sanitaire. En effet, en tant que système d'assurance qualité, cette démarche permet la production d'un compost hygiénisé grâce à un ajustement du procédé de compostage. La garantie de l'hygiénisation du compost est un critère important pour le développement de cette filière de traitement. Etant donné la conjoncture actuelle concernant l'épandage des boues sur les terres agricoles, l'assurance de la sécurité sanitaire du produit est un des facteurs qui doit permettre de pérenniser cette voie de valorisation.

Outre l'aspect sanitaire, cette démarche présente un intérêt en terme d'image de marque du produit. A priori, l'application de l'HACCP au compostage des boues doit permettre de faciliter la valorisation du compost dans le cadre d'un plan d'épandage. Selon les chambres d'agriculture, cet apport de garanties supplémentaires est nécessaire auprès des utilisateurs de matières premières agricoles et auprès des consommateurs. Afin de garantir au mieux la qualité sanitaire microbiologique du compost produit, l'AFAQ en tant qu'organisme accréditeur peut effectuer un rapport d'évaluation de la démarche HACCP. Le principe de cette évaluation est de poser un regard extérieur sur le système HACCP. Sur chaque principe défini par le Codex Alimentarius, une cotation est effectuée et des axes de progrès sont identifiés. Cependant, il ne s'agit là que d'une évaluation, l'AFAQ ne peut en aucun cas se placer en tant que conseiller, elle ne remet pas en cause le système, par exemple les CCP. L'intérêt de cette évaluation réside dans le fait qu'il est possible de préciser que la qualité du compost est assurée par application de la démarche HACCP. Cependant ce type de démarche ne peut pas faire l'objet d'une certification contrairement à un système d'assurance qualité de type ISO 9000.

Cette démarche implique une réflexion globale sur le procédé utilisé. Il est possible d'envisager l'application de cette méthode dans le but de modifier ou d'optimiser un procédé de compostage. Ainsi, cette méthode et surtout les conseils émis dans le guide d'application présentent pour certains gérants de plates-formes un intérêt d'une part car elle permet de garantir la qualité sanitaire microbiologique du compost mais aussi car une liste de moyens permettant la maîtrise du procédé de compostage est identifiée.

D'autre part, l'application de la démarche HACCP au compostage des boues permet d'obtenir un produit de composition stable. En effet, l'ajustement des proportions du mélange (au niveau du CCP1 identifié) permet d'assurer la constance des caractéristiques physico-chimiques du compost produit.

4.2.1 HACCP et ISO 9000

Les sites possédant le maximum de pré-requis nécessaires à l'application de l'HACCP, sont en cours de certification ISO (9002 en général). C'est pourquoi il est intéressant de replacer le système HACCP dans un contexte d'assurance qualité et de se poser la question de la compatibilité de l'ISO et de l'HACCP.

4.2.1.1 Les démarches d'assurance qualité

Elles sont orientées vers le respect des exigences spécifiées. Cinq leviers sont identifiés dans l'approche du management de la qualité [3] :

1. La planification de la qualité : détermination de la politique qualité et des objectifs à long, moyen et court termes ainsi que la spécification des plans particuliers.
2. La maîtrise de la qualité : ensemble des activités tant opérationnelles que de soutien qui servent à obtenir la qualité définie.
3. L'amélioration de la qualité grâce à un cycle permanent qui part de l'identification des non-conformités et comprend les mesures correctives et préventives, leur suivi et la rétroaction continue.
4. L'assurance interne de la qualité : confiance que détient la direction que la qualité sera atteinte parce que les résultats des audits internes et externes démontrent que son système qualité fonctionne bien.
5. L'assurance externe de la qualité : confiance donnée au client de la part du fournisseur que toutes les exigences liées au contrat sont respectées.

4.2.1.2 Le système ISO en tant que système d'assurance qualité :

Les normes ISO 9000 servent à construire, à compléter et à améliorer des systèmes qualités dans tout type d'entreprise en vue de donner l'assurance de la qualité à ses clients et à sa direction. Les normes actuelles de la série ISO comprennent :

- La norme ISO 9001 : *Modèle pour l'assurance de la qualité en conception, développement, production, installations et prestations associées.*
- La norme ISO 9002 : *Modèle pour l'assurance de la qualité en production, installations et prestations associées.*
- La norme ISO 9003 : *Modèle pour l'assurance de la qualité en contrôle et essais finaux.*

La norme ISO 9002 est la norme actuellement mise en place sur certaines plates-formes de compostage. C'est celle que nous étudierons. Remarque : cette série de norme va être modifiée. Le projet de norme ISO 9001:2000 [22] reprend l'ensemble des trois normes présentées précédemment (ISO 9001 à 9003) et sa mise en application est prévue pour fin 2002 (Com. Pers. J-P DUPUY ; Ingénieur qualité ADEME DDM).

Le système ISO 9000 est un système d'assurance qualité reconnu au niveau international. Il englobe la maîtrise de tous les risques de défaillance du produit, des processus industriels et administratifs, des prestations associées et de leur conception.

Cependant, les ISO ne décrivent que des éléments d'organisation, elles ne comportent aucune description des moyens techniques utilisables par secteur d'activité ; elles ne contiennent pas non plus d'indications sur la façon d'établir les dispositions relatives à l'assurance de la qualité. Elles incitent seulement chaque utilisateur à avoir recours à une méthode spécifique appropriée telle que l'HACCP pour garantir la sécurité sanitaire du produit.

4.2.1.3 Le système HACCP

Le système HACCP est une méthode qu'il est possible d'utiliser pour mettre en œuvre l'assurance de la qualité. Cette méthode est particulièrement adaptée à l'élaboration de plans assurance qualité spécifiques, en particulier pour ce qui se réfère à la sécurité des produits.

L'originalité de l'HACCP réside dans le fait qu'il permet une identification et une analyse des risques liés à chacun des stades de la fabrication d'un produit qui débouche par la suite sur une stratégie d'intervention directe et sur des moyens à mettre en œuvre au niveau d'étapes identifiées. Les mesures de lutte visent des opérations du procédé bien définies, contribuant de façon décisive à la sécurité finale du produit.

De part son identification avec la notion de plan d'assurance qualité, cette méthode est plus restrictive car axée vers la sécurité sanitaire du produit :

- Elle s'applique spécifiquement à un produit et à un processus de fabrication.
- Elle considère spécifiquement la séquence des activités nécessaires pour prévenir d'un danger.
- Elle ne considère que ces activités, sans être étendue aux autres activités ou secteurs de l'entreprise.

Le système HACCP est donc un ensemble de démarches raisonnées, structurées qui se succèdent dans un ordre logique pour atteindre un objectif défini

4.2.1.4 L'association de l'HACCP et de l'ISO 9002

Ces deux systèmes qualité peuvent être associés. Les normes ISO 9000 fournissent une bonne base pour de nombreuses exigences du système HACCP. L'application de l'HACCP au sein de l'ISO 9002 peut aboutir à un système d'assurance de la qualité sanitaire plus efficace qu'une application seule d'un ISO 9001 ou de l'HACCP [1]. L'application de l'HACCP pour l'identification et la maîtrise des risques est liée à l'organisation de la qualité et aux actions préventives exigées pour l'ISO. Une fois les points critiques identifiés, les principes de l'ISO peuvent être utilisés pour contrôler et vérifier les paramètres déterminés. Enfin les procédures pour mettre en place la démarche HACCP peuvent être documentées au sein du système qualité ISO. Ainsi, l'existence d'un système ISO facilite la mise en place du plan HACCP.

L'Annexe 6 permet de recenser l'ensemble des articles de la norme ISO 9002, en listant pour chacun d'entre eux les caractéristiques de l'HACCP qui s'y rapportent.

4.2.1.5 Conclusion

L'application de l'HACCP au procédé de compostage des boues ne peut faire l'objet d'une certification mais présente des garanties supplémentaire quant à la qualité sanitaire microbiologique du compost. L'application d'une telle démarche peut présenter un plus lorsqu'une démarche ISO est en place sur un site car permet de répondre à l'Article 9 de l'ISO 9002 : maîtrise des procédés (Cf. Annexe 6).

4.2.2 HACCP et Homologation concernant les matières fertilisantes - supports de culture

D'après l'article 3 de la loi du 13 juillet 1979, relative à l'organisation du contrôle des *matières fertilisantes* et des *supports de culture* précise que "les homologations ne peuvent être accordées qu'aux produits qui ont fait l'objet d'un examen destiné à vérifier leur efficacité et leur innocuité à l'égard de l'homme, des animaux et de leur environnement dans les conditions d'emploi prescrites ou normales". Ceci implique donc, d'après le guide [9] :

- De connaître ce(s) produit(s) : une caractérisation la plus complète possible est donc nécessaire. (résultat d'analyse effectuée à partir d'un échantillon représentatif)
- De s'assurer de sa constance de composition :
 1. L'homogénéité concernant la composition du lot.
 2. L'invariabilité de la composition des différents lots. – la composition moyenne de chaque lot doit être égale à la composition annoncée
 3. La stabilité pour chaque lot mis sur le marché (quelques soit le stade de mise sur le marché).

Pour apprécier la constance de composition du produit, il est précisé qu'il faut tenir compte des matières premières (qui doivent être conformes à l'ensemble des réglementations qui leur sont applicables, concernant notamment leur fabrication, leur stockage, leur transport ou leur utilisation) et du procédé de fabrication.

- L'efficacité agronomique est appréciée grâce à une série de tests et analyses effectués en laboratoire.
- "L'innocuité" doit être démontrée.
- La mise en place d'un système d'auto - contrôle et de surveillance en routine de la fabrication du (des) produit(s) est indispensable. La mise en place d'un système du type « démarche qualité normalisée », sur la fabrication du produit ou sur la fabrication de certaines matières premières susceptibles de présenter des risques (boues d'épuration, produits d'origines résiduelles par exemple) permet de garantir avec plus de fiabilité la sécurité sanitaire du produit.

La démarche HACCP appliquée au compostage des boues permet d'assurer le respect d'un grand nombre de ces points relatifs à l'homologation : Les points de contrôle au niveau du mélange des matières premières et de la maturation permettent d'assurer la constance de composition du produit (stabilité, homogénéité et invariabilité). La qualité sanitaire microbiologique est assurée (c'est l'objet de l'HACCP), il est possible de maîtriser le risque sanitaire lié à la présence d'ETM ou de MPO (par une action sur les intrants (Cf. 5- Conclusion)). En outre, les proportions initiales du mélange peuvent être ajustées afin que le compost produit réponde aux critères d'efficacité.

Ainsi, l'application de l'HACCP peut présenter un avantage dès lors que le compost produit par une plate-forme est homologué.

5 - CONCLUSION

L'étude réalisée permet de conclure favorablement sur l'applicabilité du système HACCP au principe de compostage des boues de station d'épuration. Le déroulement du plan de travail en douze points permet l'identification de trois points critiques (CCP) afin de maîtriser le risque lié à la présence, la survie ou la croissance de microorganismes pathogènes d'origine fécale. La détermination de ces points semble généralisable à l'ensemble des plates-formes, par contre les limites critiques et actions correctives à mettre en place dépendent du procédé et de la technique de compostage. Elles doivent être envisagées site par site.

Bien que le système HACCP soit applicable à cette filière de traitement des boues, l'étude met en avant un certain nombre de limites et de contraintes humaines, scientifiques et financières. La visite des cinq plates-formes de compostage permet d'identifier une liste de pré-requis nécessaires sur les sites.

Le projet doit déboucher par la suite sur la création d'un club permettant, en faisant appel à des gérants de plates-formes, d'approfondir les aspects technologiques du compostage (étant donné que nous ne sommes pas des experts en procédé de compostage) et éventuellement de se consacrer à l'application de la démarche sur un site pilote.

Cette étude propose d'appliquer la démarche HACCP afin de maîtriser les risques liés à la présence de microorganismes pathogènes d'origine fécale. Cependant, le système de contraintes lié à la valorisation de compost de boues sur les terres est plus large. En effet, le produit utilisé doit répondre à d'autres exigences d'une part au plan agronomique et d'autre part au plan sanitaire.

Hormis les microorganismes pathogènes d'origine fécale, la présence d'ETM et de MPO dans les boues compostées présente un risque sanitaire lors de l'utilisation de ce produit. La maîtrise du risque liés à la présence de ces éléments est envisagée par la réglementation concernant l'épandage des boues résiduaires ; l'arrêté du 8 janvier 1998 impose de rediriger la boue vers une autre filière d'élimination dès lors que les teneurs en ETM ou MPO dépassent les seuils fixés. D'autre part, l'objectif de l'HACCP peut être élargi afin d'englober la maîtrise du risque sanitaire lié à la présence de ces éléments chimiques :

- Concernant les ETM, l'identification d'un CCP sur les matières premières peut être envisagée. Dès lors que les concentrations en ETM dans les boues et/ou dans l'agent structurant excède certains seuils, les matières premières sont redirigées vers d'autres filières d'élimination des déchets (CET ou oxydation thermique).
- Quant aux micro polluants organiques, le compostage permet la dégradation de certains d'entre eux. L'identification des paramètres qui influencent leur décomposition peut permettre de déterminer un ou plusieurs points critiques au cours du procédé de compostage.

L'élargissement du système HACCP à la maîtrise de l'ensemble des risques sanitaires liés à l'épandage des boues serait plus avantageux. Cependant l'HACCP n'est pas le seul outil pour la gestion de la qualité ; son intégration dans l'ensemble du système représenterait un plus pour cette filière de valorisation des boues.

L'application d'un système HACCP à une filière de traitement des boues dans le but de garantir l'hygiénisation du produit obtenu est envisageable dès lors que les facteurs permettant l'hygiénisation de la boue (température, pH...) sont identifiés et font l'objet d'un minimum de surveillance sur le site. D'autre part, la traçabilité des boues doit être assurée tout au long du procédé de traitement afin que l'origine du lot de compost épandu puisse être

retrouvée. L'application d'une telle méthode doit être motivée par l'exploitant de la plate-forme qui affiche une réelle volonté d'appliquer cette démarche et fixe ainsi les objectifs de qualité sanitaire. Le système HACCP peut ainsi être décliné dans le cadre de filières de traitement des boues autre que le compostage qui permettent grâce à des facteurs identifiés de produire un compost hygiénisé : la digestion thermophile, la stabilisation thermophile ou le chaulage sont citées dans la littérature en tant que traitement hygiénisant.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AFNOR; Produits agricoles et alimentaires - Guide pour l'application de l'ISO 9001 et de l'ISO 9002 dans les industries de l'agro-alimentaire et des boissons; P16P/GT 2 "caractérisation des boues - Guides de bonne pratique"
- [2] AMGAR A. ; Le système HACCP composante de la sécurité alimentaire; Microbiologie prédictive et HACCP : comptes-rendus de la deuxième conférence internationale ASEPT 10-11 juin 1992 - LAVAL - FRANCE; ASEPT Editeur.
- [3] ASEPT; site Internet : www.asept.asso.fr/haccp1.htm
- [4] BÖGEL K.; Quality Assurance Systems and HACCP Concept; Microbiologie prédictive et HACCP : comptes-rendus de la deuxième conférence internationale ASEPT 10-11 juin 1992 - LAVAL - FRANCE; ASEPT Editeur.
- [5] BOURGEOIS C. M., MESCLE J.-F. Et ZUCCA J.; 1995 ; Microbiologie alimentaire, Aspect microbiologique de la sécurité et de la qualité des aliments; Lavoisier TEC & DOC, collection sciences & techniques agroalimentaires
- [6] BOUTIN P., MOLINE J. 1987; Health and safety aspects of compost preparation en d use; Compost : production, quality and use. Elsevier applied science publisher ltd, London and New-York. 853pp. : 198-209;
- [7] BRUETSCHY A., BOVE E., CARTON D. et CUINIER C.; Elaboration des vins : sécurité, qualités, méthodes ; Introduction à l'HACCP et à la maîtrise des défauts ; CRITT HYGINOV centre technique interprofessionnel de la vigne et du vin; Lavoisier TEC & DOC
- [8] BRYAN Frank L.; L'analyse de risques - Points critiques pour leur maîtrise. Comment apprécier les risques liés à la préparation et à la conservation des aliments ? ; Genève : OMS, 1994 78p, tab., graph., réf. 6p.
- [9] Commission des Matières Fertilisantes et des Supports de Culture; 12 février 1999; GUIDE pour la CONSTITUTION des DOSSIERS de DEMANDE d'HOMOLOGATION MATIERES FERTILISANTES - SUPPORTS DE CULTURE; Ministère de l'agriculture et de la pêche.
- [10] Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France - Section des Eaux; 1998; Risques sanitaires liés au boues d'épuration des eaux usées urbaines; Lavoisier TEC & DOC;
- [11] DE BERTOLDI M., ZUCCONI F., CIVILINI M. ; 1988; The Biology of Composting : A Review. Waste Manage. Res., 1 : 157-176.
- [12] DE BERTOLDI M., MANZANO M., CIVILINI M.; 1988; Sewage sludge and agricultural waste hygienization trough aerobic stabilisation and composting; E.E.C Symposium ou treatment and use of sewage sludge and liquid agricultural wastes; Athenes - 1-4 octobre 1990
- [13] DE BERTOLDI M., ZUCCONI F., CIVILINI M.; 1988; Temperature, pathogen control and product quality. BioCycle, 29(2): 43-7, 50.

- [14] DE CHAISEMARTIN M., HERRY J.-M., SADOUDI A.-K.; Analyse de la fiabilité : une approche quantitative de l'HACCP; Microbiologie prédictive et HACCP : comptes rendus de la deuxième conférence internationale ASEPT 10-11 juin 1992 - LAVAL - FRANCE; ASEPT Editeur.
- [15] DEPORTES I., 1997; Contribution à l'évaluation des risques liés au compostage des ordures ménagères; Groupe pour l'étude du Devenir des Xéno biotiques dans l'Environnement - université Joseph FOURRIER - Grenoble I; 161p.
- [16] ELISSALDE N., GNIERE J-P, L'HOSTIS M., LEGEAS M., DEMILLAC R., CARRE J.; 1994 ; Les germes pathogènes dans les boues résiduaire des stations d'épuration urbaines; Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. (A.D.E.M.E.). FRA, Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes. Nantes. FRA, Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau. Paris. FRA, Ecole Nationale de la Santé Publique. (E.N.S.P.). Rennes. FRA; Collection ADEME : valorisation agricole des boues d'épuration - Connaître pour agir : guides et cahiers techniques.
- [17] EPSTEIN E.; 1998; Pathogenic health aspect of land application; BioCycle, September 1998 : 62-67
- [18] FEACHEM R.G., BRADLEY D.L., GARELICK H. & MARA D.D., 1983; Sanitation and disease; Health aspect of excreta and wastewater management; Wiley, Chischester, UK, 79.
- [19] GOLUEKE C.G.; 1983; Epidemiological aspects of sludge handling and management; BioCycle july/august 1983 : 50-57
- [20] HARWIG J., SHARPE A.N. et DODDS K.; Guidance concerning microbiological criteria, microbiological testing and associated methods for the food industry and regulatory agencies in Canada; Government of Canada, April 1998
- [21] HUSSONG D., BURGE WD., ENKIRI NK.; 1985; Occurrence, growth and suppression of salmonellae in composted sludge. Appl. Environ. Microbiol., 50(4) : 887-893
- [22] International Standard Organisation; Guidelines on the application of ISO 9001:2000 for the food and drink industry; ISO/DIS 15161.2; 11/11/1999.
- [23] JEHANNO F. ;. 1995 ;Suivi de l'évolution des micro-organismes pathogènes pour l'homme dans un compost de mélange de broyat de déchets végétaux et de boues de station d'épuration ; Ecole nationale de la santé publique. (E.N.S.P.). Rennes. FRA ;, 70p.; Mémoire ENSP d'Ingénieur Sanitaire.
- [24] KAISER M.; 1983; L'analyse microbiologique des composts; Compost information n°13 - 3eme trimestre 1983
- [25] MERILLOT J.M.; 1995; Stage Compostage ADEME/APCA - 19 au 23 juin 1995;
- [26] MONTCHARMONT A.; 1999; Les risques sanitaires liés à l'épandage de boues de stations d'épuration urbaines; Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon, Thèse présentée le 30 mars 1999;
- [27] MOREL J.-L., NICOLARDOT B.; 1986 ;Revue des principales méthodes pour apprécier la maturité des compost urbains; Compost Information n°22 : p12-19.
- [28] MUSTIN M.; 1987; Le compost : Gestion de la matière organique, Eds F. DUBOSC, Paris, 953pp.

- [29] NELL J.H., STEER A.G., VAN RENSBURG P.A.J.; 1983; Hygienic quality of sewage sludge compost. *Water Sci. Technol.*, 15 : 181-194
- [30] PEREIRA-NETO JT., STENTIFORD EI., MARA DD.; 1987; Comparative survival of pathogenic indicators in windrow and static pile; *Compost : production, quality and use; Compost : production, quality and use*. Elsevier applied science publisher ltd, London and New-York. 853pp. : 276-295;
- [31] QUITTET C. Et NELIS H.; 1999 ; HACCP pour PME et artisans - secteur alimentaire autre que viandes, poissons, produits laitiers TOME 1
- [32] RICHARD TL.; 1992; Municipal solid waste composting : physical and biological processing. *Biomass and Energy*, 3(3-4) : 163-180.
- [33] SAVY Olivier ; Application de la méthode HACCP aux processus de production/distribution d'eau potable. Contribution à la l'élaboration d'un guide d'application ; Ecole nationale de la santé publique. (E.N.S.P.). Rennes. FRA ; 1999/09, 28-29Pages62p., tabl., graph., ann., 46 réf, Mémoire ENSP d'Ingénieur Sanitaire.
- [34] SCHWARTZBROD J.; SCHWARTZBROD L; 1999; Les agents biologiques d'intérêt sanitaire des boues d'épuration urbaines; ADEME / Faculté de pharmacie Université H. POINCARE Nancy I.
- [35] SKANAVIS C., YANKO W.-A.; 1994; Evaluation of composted sewage sludge based soil amendments for potential risks of Salmonellosis; *Journal of Environmental Health - Vol 56, N°7* : 19-23.
- [36] SOARES HM, CARDENAS B, WEIR D, SWITZENBAUM MS; 1995; Evaluating pathogen regrowth in biosolids compost. *Biocycle*, June : 70-76
- [37] STRAUB TM., PEPPER IL., GERBA CP.; 1993; Hazard from pathogenic micro-organisms in land-disposed sewage sludge; *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, 132 : 55-91
- [38] STRAUCH D.; 1987; Microbiological specification of disinfected compost; *Compost : production, quality and use*. Elsevier applied science publishers ltd, London and New York. 835pp. : 210-229.
- [40] VEYRET Jérôme ;Hygiénisation de boues chaulées de station d'épuration par compostage mixte avec des supports carbonés ; Ecole nationale de la santé publique. (E.N.S.P.). Rennes. FRA ; 1996/09, 72p., réf. 3p ; Mémoire ENSP d'Ingénieur Sanitaire.
- [41] WIART J., MAZAUD D.; 1997; Compostage conjoint boues et déchets verts ; ADEME Angers
- [42] WIART J.; 1999; Le Compostage des boues de station d'épuration ; ADEME Angers
- [43] WIART J.; 1999; Amendements organiques et composts : situation réglementaire actuelle et perspectives d'évolution ; ADEME Angers

GLOSSAIRE ET ABREVIATIONS

Actinomycètes : bactérie filamenteuse, longtemps restée classée dans les champignons. Régulièrement utilisées par les industries pour la production d'antibiotiques;

Biodégradabilité : faculté potentielle d'un composé organique à être transformé en des structures simples par des processus enzymatiques.

Boues de STEP : STEP (Station d'épuration), déchets résultant du traitement des eaux usées

CET : Centre d'enfouissement technique

Compost : produit du compostage stabilisé et hygiénisé bénéfique à la croissance végétale. Il est plus considéré comme un support de culture que comme un engrais.

Compost frais : matière organique qui a traversé le stade thermophile du compostage et qui est normalement hygiénisée. Le compost est partiellement décomposé mais n'est pas stabilisé.

DMI : Dose minimale infectante

EPA : Environmental Protection Agency – Agence américaine pour la protection de l'environnement

ETM : Eléments Traces Métalliques

Hygiénisation : Entendu dans le contexte comme l'élimination des microorganismes pathogènes issus de la contamination fécale.

Lot : quantité de matière fertilisante ou de support de culture fabriquée ou produite dans des conditions supposées identiques et constituant une unité ayant des caractéristiques présumées uniformes (arrêté du 8 décembre 1982).

MPO : Micro-polluants organiques

Matière fertilisante : Tout produit dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Elles comprennent notamment les engrais et les amendements. (loi n°79-595 du 13 juillet 1979)

N₅₀ : Dose ingérée provoquant 50% d'infection dans une population exposée

Phase Mésophile : phase du compostage où la température atteint 30 à 45°C

Phase Thermophile : phase du compostage durant laquelle la température de la masse dépasse 45°C.

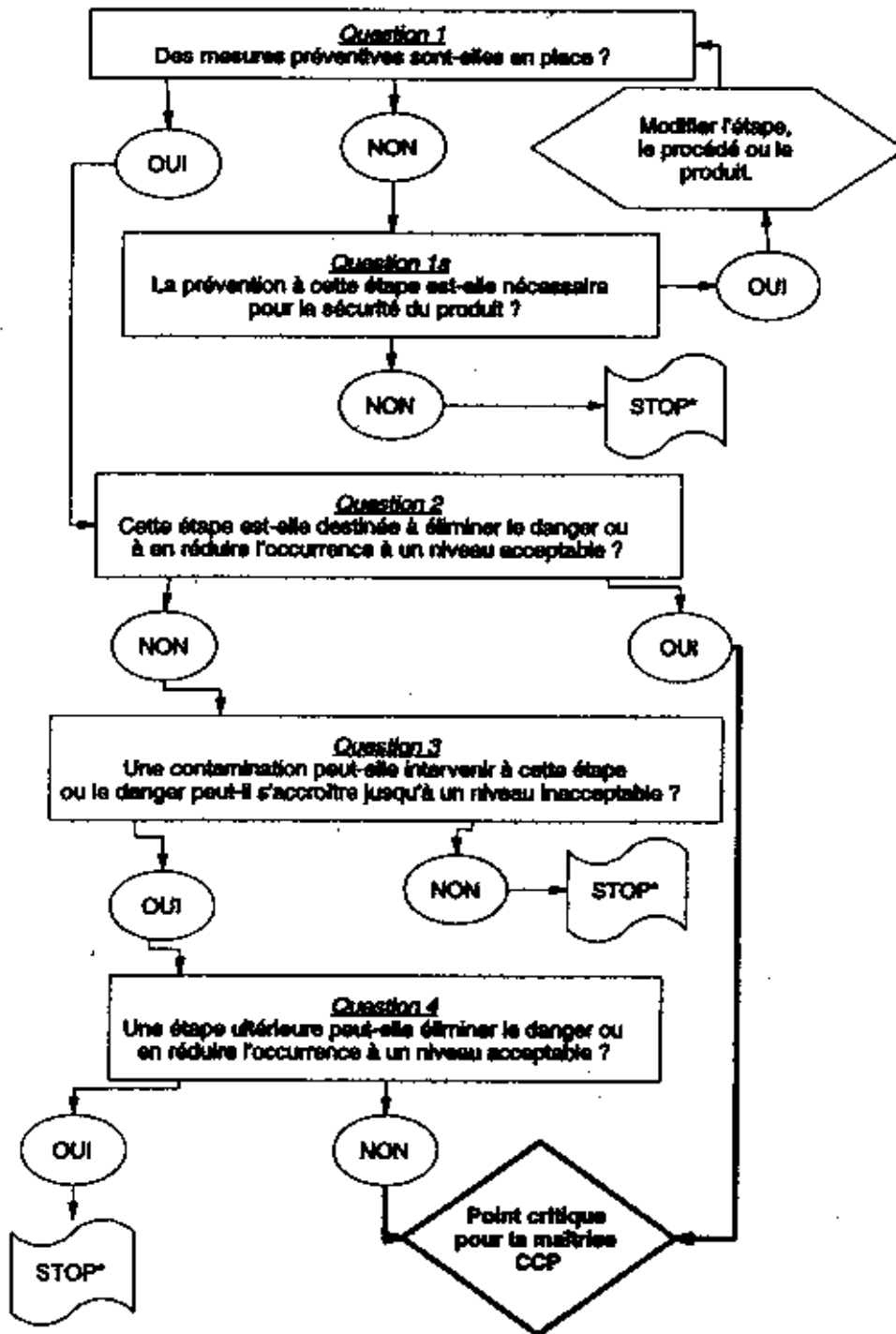
PRSP : Process to Significantly Reduce Pathogens

PRFP : Process to Further Reduce Pathogens

Support de culture : Tout produit destiné à servir de milieu de culture à certains végétaux ou dont la mise en œuvre aboutit à la formation de milieux possédant une porosité telle qu'ils sont capables à la fois d'ancrer les organes absorbants des plantes et de leur permettre d'être en contact avec les solutions nécessaires à leur croissance (loi n°79-595 du 13 juillet 1979, décret n°80-478 du 16 juin 1980)

Stabilisation ou Maturation : deuxième étape du compostage (après la phase de décomposition ou phase active). Cette étape est caractérisée par des processus métaboliques lents, par une température inférieure à celle atteinte précédemment et par la formation d'humus.

ANNEXE 1 : DETERMINATION DES POINTS CRITIQUES – ARBRE DE DECISION



* L'étape n'est pas un CCP : appliquer l'arbre de décision au danger suivant ou à l'étape suivante.

ANNEXE 2 : PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE – PLATE FORME E

1. Première série de prélèvements : Prélèvement sur des boues brutes [code échantillon : A].

Lors de l'arrivée des boues sur le site, prélever un échantillon moyen (en différents endroits si possible afin d'avoir une idée globale de la contamination)

Remarque : Cette boue brute doit être issue de la même STEP que les autres boues prélever par la suite au cours du compostage.

2. Seconde série de prélèvements : phase active de compostage

But : Evaluation de l'hygiénisation du tas suite à la phase active de compostage

Evaluation de la dispersion des niveaux de contamination sur une coupe

Lors de la phase active du compostage, l'aération du tas s'effectue à l'aide d'un ventilateur qui crée un flux d'air à l'intérieur de l'andain. Durant cette phase, le tas de compost n'est pas retourné. Un gradient de température s'instaure dans l'andain. Afin de contrôler l'hygiénisation du compost à la fin de cette phase, des prélèvements seront effectués en différents point de l'andain (Cf. Figure 2). En chaque point de prélèvement, la température sera mesurée.

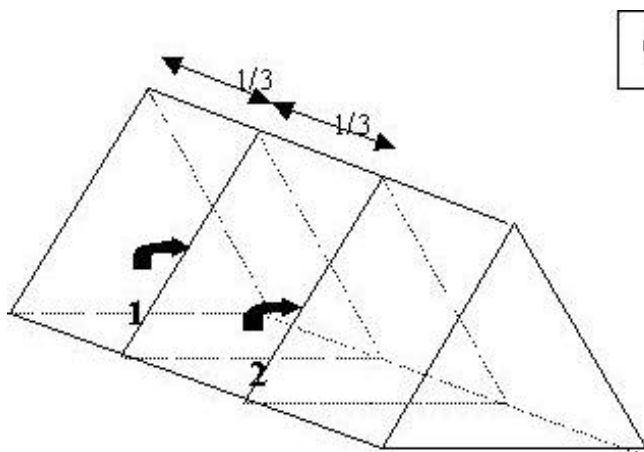


Figure 1 : localisation des coupes (1 et 2) au niveau desquelles des échantillons seront prélevés.

Dans chacune de ces zones, un échantillon moyen est prélevé

Un échantillon moyen correspond à un prélèvement ponctuel aléatoire, dans la zone déterminée. Les échantillons issus des deux coupes et situé dans les mêmes zones sont mélangés : (B1+B2), (D1+D2) et (C1+C2)

- Zone B : zone proche de la couche isolante (à environ 5 cm) .[code échantillon : B]
- Zone C : zone située au cœur de l'andain [code échantillon : C]
- Zones D : zones situées à proximité des drains permettant l'aération de l'andain. Prélever un échantillon moyen dans cette zone .[code échantillon : D]

Remarque : étant donné la structure du compost à cette étape du procédé, les échantillons seront exclusivement composés des parties fines du compost.

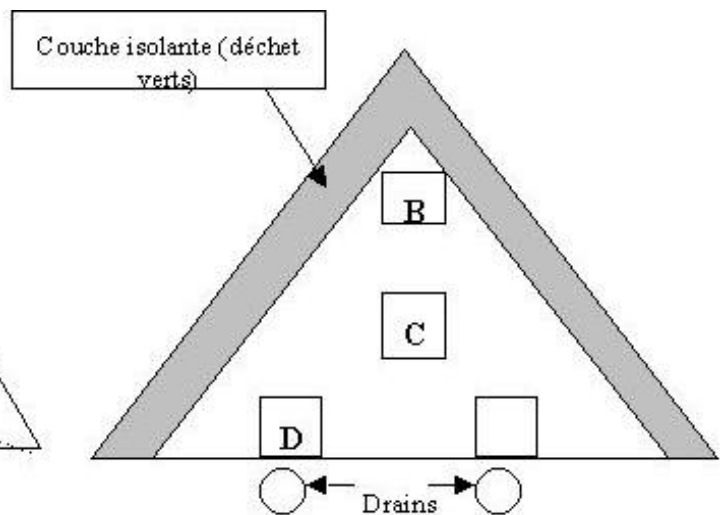


Figure 2 : Zone de prélèvement des échantillons de compost - Vue en coupe de l'andain

Au niveau de ces points de prélèvements, des mesures de températures seront réalisées. (Des relevés de température en surface durant toute la phase active pourrait avoir un intérêt : il serait alors possible de comparer l'évolution de la température au cœur de l'andain avec l'évolution de ce même paramètre en surface)

3. troisième série de prélèvements : fin de maturation. [code échantillon : E]

But : Evaluation de l'hygiénisation du tas avant l'épandage sur les terres agricoles.

Lors du criblage, le tas de compost est re mélangé, ainsi le prélèvement d'un seul échantillon moyen de compost apparaît suffisant.

4. Transport des échantillons :

Suite au prélèvement des échantillons, les stocker sous couvert du froid dans l'attente de leur expédition.

ANNEXE 3 : TEMPERATURE DE L'ANDAIN PRELEVE SUR LE SITE B

Ce document représente les caractéristiques de l'andain prélevé le jour de notre visite de la plate-forme du site B le 4 juillet 2000.

Date de fabrication : 9-06-2000

Composition paille 27T Copeaux 41T MS Boues 41T

DATE	Température °C	Pluviométrie (mm)	Température Andain	Retournement ?
9/06	28°	0		
13/06	20°	10	66°C	
14/06	19°	0		R
15/06	16°	0		
16/06	20°	0		
19/06	28°	0	72°C	R
20/06	28°	0		
21/06	18°	0		
22/06	17°	0	74°C	
23/06	21°	0		
26/06	18°	0		
27/06	18°	0	68°C	R
28/06	14°	1		
29/06	24°	0		
30/06	19°	0	70°C	
03/06	17°	12		R
04/06	16°	14		

ANNEXE 4 : SYSTEME DOCUMENTAIRE PROPOSE [31]

MANUEL DE BASE

Ce classement permet à n'importe quelle personne pénétrant pour la première fois dans un établissement de connaître le fonctionnement de l'entreprise tant en ce qui concerne les Bonnes Pratiques d'Hygiène, l'organisation de travail, les activités exercées et bien sûr le point de vue lié directement au système HACCP (point critique de maîtrise).

Mais, il a surtout l'avantage au sein de l'entreprise même, que ce soit pour le responsable de l'établissement ou une personne de la production, de trouver facilement tous les renseignements dont il a besoin immédiatement (adresse d'un fournisseur, fiches techniques de produits, etc.).

Il est d'autant plus utile qu'en cas de changement de personnel, de remplacement, d'embauche, il peut servir de point de départ pour la formation.

1. Généralités

- **Organisation de l'entreprise**

Documents permettant d'identifier le fonctionnement de l'entreprise et les activités exercées. Documents relatifs aux réunions HACCP

- **Documents officiels**

Documents relatifs aux autorisations de fabrication, aux agréments, les circulaires officielles, etc. ; tous les documents liés aux services d'inspection.

2. Environnement de la plate-forme

- **Infrastructure du bâtiment**

Plan des locaux, diagramme de flux, liste des équipements, programme d'entretien.

- **Personnel**

Liste du personnel, les formations reçues, les prescriptions liées au personnel : consignes d'hygiène, liste des vêtements portés, leur lavage, etc.

- **Lutte contre les nuisibles**

Plan de lutte contre les insectes, les rongeurs : matériel utilisé, localisation des pièges, etc.

3. Matières premières

- **Spécifications matières premières**

Liste des matières premières utilisées ou fiches uniformisées des caractéristiques des matières premières.

- **Liste fournisseurs**

- Liste de tous les fournisseurs de matières premières.

- **Fiches techniques matières premières fournisseurs**

Classement des données fournies par le fournisseur: cahier des charges, fiches techniques, certificat de conformité, etc.

4. Plan(s) HACCP

- **Plan HACCP: champ de l'étude, description des produits finis, utilisation attendue du produit fini, diagramme de fabrication, analyse des dangers et mesures préventives, points critiques pour la maîtrise**

- **Procédures / Instructions de travail**

Les employés concernés disposent d'une copie.

Il s'agit par exemple de procédure pour l'étalonnage des thermomètres, etc. ou simplement des fiches de poste de travail regroupant toutes les instructions pour l'opérateur.

- **Feuilles d'enregistrements : formulaires vierges**

Classer tous les originaux des documents utilisés à ce niveau ainsi qu'un petit stock de photocopies pour les plus usités.

- **Partie confidentielle**

On renvoie généralement à un autre classeur pour indiquer les proportions exactes du mélange ect. : en bref toutes les données que l'entreprise considère comme confidentielles.

5. Enregistrements

Les petites entreprises qui ont peu d'enregistrements à classer utiliseront le même classeur. Par contre, les entreprises ayant beaucoup d'enregistrements à classer utiliseront le formulaire qui indique où sont rangés les classeurs les contenant.

- **Réception matières premières**

Documents relatifs aux contrôles effectués à la réception des matières premières.

- **Production**

Documents relatifs aux contrôles effectués pendant la production ou liés aux opérations de stockage (température) ou liés aux actions correctives prises.

6. Analyses

- **Analyses produits**

Résultats d'analyses microbiologiques, physico-chimiques réalisées sur les produits.

7. Audits

- **Audits internes**

Rapports d'audit interne ou liste des actions correctives à mettre en œuvre suite à la revue du système HACCP, etc.

- **Audits externes**

Rapports d'audit externe, à ce niveau on peut également classer les rapports des services d'inspection (rapport d'évaluation, etc.).

8. Législation

Copie des réglementations concernant les produits utilisés, le compost et son utilisation (APV, plan d'épandage...)

9. Documentation

Cours de formation: séminaires ayant un rapport direct avec le système HACCP .

10. Divers

Offres de prix pour du matériel, planning d'investissement réalisé ou prévu, etc.

ANNEXE 5 : CAMPAGNE D'ÉCHANTILLONNAGE

Cette annexe présente la campagne d'échantillonnage effectuée durant la période de l'étude. Les microorganismes analysés, les sites sélectionnés et les résultats obtenus sont présentés dans les paragraphes suivants.

Le choix de microorganismes analysés sur les échantillons prélevés doit donc permettre de juger de l'hygiénisation du compost et de l'efficacité du traitement du procédé de compostage appliqué à la boue. Suite à la discussion entamée dans le paragraphe 2.2.2. et les contraintes financières (l'analyse des entérovirus représente un coût élevé), le choix s'est porté sur les indicateurs suivants :

- les Coliformes thermotolérants et le *Clostridium perfringens* comme marqueurs d'efficacité de traitement.
- Les Salmonelles et les œufs d'helminthes comme indicateurs d'hygiénisation.

Des échantillons de compost sont prélevés sur les sites de Saint-Aubin-des-Bois et de Riscle. Ces plates-formes utilisent respectivement, le retournement périodique d'andain et l'aération forcée pour oxygéner le substrat. De plus la durée de la phase active est proche pour ces deux sites (6 à 8 semaines) et le procédé fait l'objet d'un minimum de suivi (relevé de la température et ajustement des proportions du mélange). Enfin, la motivation et la coopération de l'exploitant du site de Riscle et la proximité géographique de la plate-forme de Saint-Aubin-des-Bois (nous permettant de nous déplacer pour effectuer les analyses) sont deux facteurs jouant en leur faveur.

Concernant la prise d'échantillons de boue et de compost, la norme NFU 44-101 a pour objet de décrire la technique d'échantillonnage sur un lot « d'amendement organique ou de support de culture ou de boues des ouvrages de traitement des eaux, solides ». Cette norme propose d'utiliser la méthode des quartiers qui est relativement complexe et lourde à mettre en place. Ainsi, deux techniques d'échantillonnage appropriées à chacun des sites sont mises en place.

- Le plan d'échantillonnage suivi pour le site de RISCLE est décrit en Annexe 2. Les prélèvements sont effectués le même jour, sur divers lots en différents points du procédé de compostage. Cela doit permettre d'évaluer la dispersion transversale de la contamination au cours de la phase active (l'effet de dispersion longitudinale qui pourrait introduire un biais est réduit grâce au prélèvement d'échantillons moyens sur deux coupes au premier et deuxième tiers de l'andain) et le degré d'hygiénisation en fin de phase active et avant épandage du compost. Remarque : il ne s'agit pas d'un même lot de boues, cependant, les échantillons prélevés sont issus de compost (ou de boues) dont la STEP d'origine est la même. Le plan d'échantillonnage reste discutable, cependant, les résultats montrent que la boue et les composts répondent aux critères d'hygiénisation sur les paramètres : salmonelles et œufs d'helminthes.

Les mesures des coliformes montrent que lors de la phase active du compostage, les conditions sont plus favorables aux microorganismes en bordure extérieure (B) du tas et au niveau des drains (D), le cœur du tas (C) présentant quant à lui des conditions néfastes pour ces microorganismes puisqu'ils disparaissent. Les relevés de température effectués lors de la prise d'échantillon contredisent pourtant les analyses des coliformes car la température est plus élevée dans la zone proche de la surface que dans la zone proche des drains. (Cf. tableau 3)

Echantillons	Boues brutes	Compost "frais"			Compost criblé
		B	C	D	
Coliformes thermotolérants /g	<10	2.7 10 ⁶	<10	8 10 ³	9.4 10 ³
<i>Clostridium perfringens</i> /g	<10	10	<10	<10	<10
Salmonelle dans 25 g	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
Œufs de nématodes	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
Températures relevées		69°C	73°C	43°C	37°C

Tableau 3 : résultats des analyses microbiologiques effectuées sur du compost produit à Riscle

Il est difficile de savoir quelle est la signification des résultats des coliformes sur le compost mûr. Il aurait fallu pour cela connaître la teneur initiale en microorganismes des boues et du compost frais de ce même lot.

- Sur le site de Saint-Aubin-des-Bois, une analyse doit être effectuée en fin de phase active sur du compost fraîchement retourné. Sur ce site, le retournement du tas s'effectue à l'aide d'une « Andaineuse », le substrat est donc homogénéisé à chaque retournement. Ainsi, un prélèvement moyen (effectué en différents points de la surface) est relativement représentatif du tas de compost prélevé.

Afin de préparer au mieux la visite, une brève présentation des objectifs de l'HACCP et des analyses microbiologiques, a été expédiée au gérant qui devait se charger de programmer un retournement du tas de compost le plus vieux (en fin de phase active) pour le jour de la visite. Cependant, à la suite d'une confusion lors de notre passage sur le site, c'est un compost de milieu de phase active qui a été échantillonné.

Les analyses obtenues sont les suivantes :

Coliformes thermotolérants /g	7.7 10 ⁵
<i>Clostridium perfringens</i> /g	5. 10 ²
Salmonelle dans 25 g	Abs
Œufs de nématodes	Abs

Tableau 4: résultats des analyses microbiologiques effectuées sur du compost produit à Saint-Aubin-des-Bois

Les relevés de température effectués sur l'Andain prélevé sont reportés en Annexe 3. Les résultats montrent que le compost satisfait aux critères d'hygiénisation pour les salmonelles et les œufs de nématodes. Cependant, les résultats concernant les coliformes thermotolérants et *C. perfringens* ne sont pas interprétables (car il s'agit d'un compost de milieu de phase active).

ANNEXE 6 : REVUE DETAILLEE DE L'ISO 9002 ET DE L'HACCP [1,33]

Ce document recense la liste des articles de la norme ISO 9002, en listant pour chacun d'entre eux les caractéristiques de l'HACCP qui s'y rapportent

Article 1 : Responsabilité de la direction

Cet article définit la politique qualité, il s'agit du concept de base de l'HACCP. L'objectif de la démarche HACCP est de garantir la qualité sanitaire du compost produit. La constitution de l'équipe HACCP s'effectue dans le cadre de la détermination des responsabilités et de l'autorité en matière de qualité et de sécurité.

La revue de la direction est considérée être une partie critique du développement et de l'amélioration continue du système HACCP.

Article 2 : Le système qualité

Cet article concerne la planification de la qualité. Il est recommandé que les procédures relatives au système HACCP soient facilement identifiables pendant les audits du système.

Article 3 : Revue de contrat / Commande

Dans cet article, les exigences du client vis-à-vis du produit fabriqué sont précisées. Il est possible d'intégrer dans ce paragraphe les éléments des étapes 2 et 3 du plan de travail en 12 points de la démarche HACCP : décrire le produit et identifier son utilisation attendue.

Article 4 : Maîtrise de la conception

Cet article ne fait pas partie du domaine d'application de l'ISO 9002. Il concerne exclusivement l'ISO 9001, cependant, dans la nouvelle norme ISO 9001:2000, cet article apparaîtra.

Article 5 : Maîtrise des documents et des données

L'ISO 9002 exige l'établissement d'un système complet de maîtrise des documents et des données qui doit couvrir tous les domaines de la norme. Par déduction, ceci couvre également le système HACCP lorsque ces deux systèmes sont intégrés. Cet article reprend donc le point 12 du plan de travail : établissement d'un système documentaire

Article 6 : Achats

Cet article présente les dispositions prises pour sélectionner et évaluer les achats : les matériaux et services utilisés par le fournisseur pour satisfaire aux exigences du client. Concernant le compostage des boues, les éléments suivants peuvent être inclus :

- les matières premières : boues et agent structurant ;
- les effluents issus de la plate-forme ;
- la maintenance, les équipements et le conditionnement du produit ;
- les services des laboratoires de contrôle ;
- le transport ;

Ce paragraphe est associé au point 2 du plan de travail : description du produit.

Article 7 : Maîtrise du produit fourni par le client.

Cet article n'a pas lieu d'être dans le cadre du compostage étant donné que lors de prestations effectuées aucun produit n'est fourni par le client.

Article 8 : identification du produit et traçabilité.

L'identification et la traçabilité du produit sont des conditions préalables à l'application de l'HACCP. Ces notions sont mises en avant dans la phase 2 de la méthode HACCP.

Article 9 : maîtrise des procédés.

Cet article précise l'importance de maîtriser le processus mais ne propose pas de moyens à mettre en œuvre. Par contre, la maîtrise du procédé de compostage est centrale dans l'application d'une démarche HACCP, c'est l'objet de ce système. En effet, l'HACCP propose une démarche structurée et progressive décrite dans le plan de travail : constitution du diagramme de fabrication, identification des dangers, détermination des CCP, établissement des limites critiques, d'un système de surveillance et d'un plan d'actions correctives (Phases 4 à 10).

Article 10 : Contrôles et essais.

Cet article a pour objet de définir les règles appliquées pour s'assurer que les matières premières et les prestations réalisées par la plate-forme de compostage sont conformes aux exigences spécifiées. Ce paragraphe est mis en rapport direct avec les phases 8 (définition des limites critiques), 9 (définition du système de surveillance des contrôles) et 11 (procédures de vérification de l'efficacité de fonctionnement) de la méthode HACCP

Article 11 : Maîtrise des équipements de contrôle, de mesure et d'essai.

Article 12 : états des contrôles et des mesures.

Ces deux chapitres sont mis en correspondance avec le point 9 (définition du système de surveillance des contrôles) du système HACCP. Il convient en effet de connaître le degré de précision des équipements de mesure et de contrôle pour déterminer les phases de maîtrise adéquates.

Article 13 : maîtrise du produit non conforme.

Article 14 : actions correctives et préventives

Ces deux articles peuvent être mis en correspondance directe avec la phase 10 de la méthode HACCP (mise en place des actions correctives). Il permette de décrire les dispositions prises pour traiter ou en prévision de tous les incidents susceptibles de survenir. Ceci permet d'assurer que le produit est fabriqué dans des conditions maîtrisées.

Article 15 : manutention et stockage.

Il est nécessaire que les procédures assure la provenance et l'âge des boues stockées ceci en vue de garantir la traçabilité du compost distribué. Ceci fait référence à l'étape 2 (description du produit) de la démarche HACCP.

Article 16 : maîtrise des enregistrements relatifs à la qualité.

Pour apporter la preuve que le système qualité est efficace et que les prestations réalisées sont conformes aux exigences spécifiées, il convient d'enregistrer les actions ou les documents qui attestent de l'exécution d'actions prévues ou de la conformité du service fourni.

Ceci est mis en correspondance avec le point 12 (établissement du système documentaire) de la méthode HACCP qui impose l'établissement d'un système documentaire en deux parties : l'une relative aux procédures propres au plan HACCP et l'autre propre aux enregistrements des résultats et de la surveillance.

Article 17 : audits qualité internes.

Ce chapitre décrit les dispositions mises en place pour contrôler que le système qualité décrit dans le manuel qualité est bien appliqué et efficace.

La phase 11 de l'HACCP impose de vérifier le système qui peut être effectué par l'intermédiaire d'Audits.

Article 18 : formation.

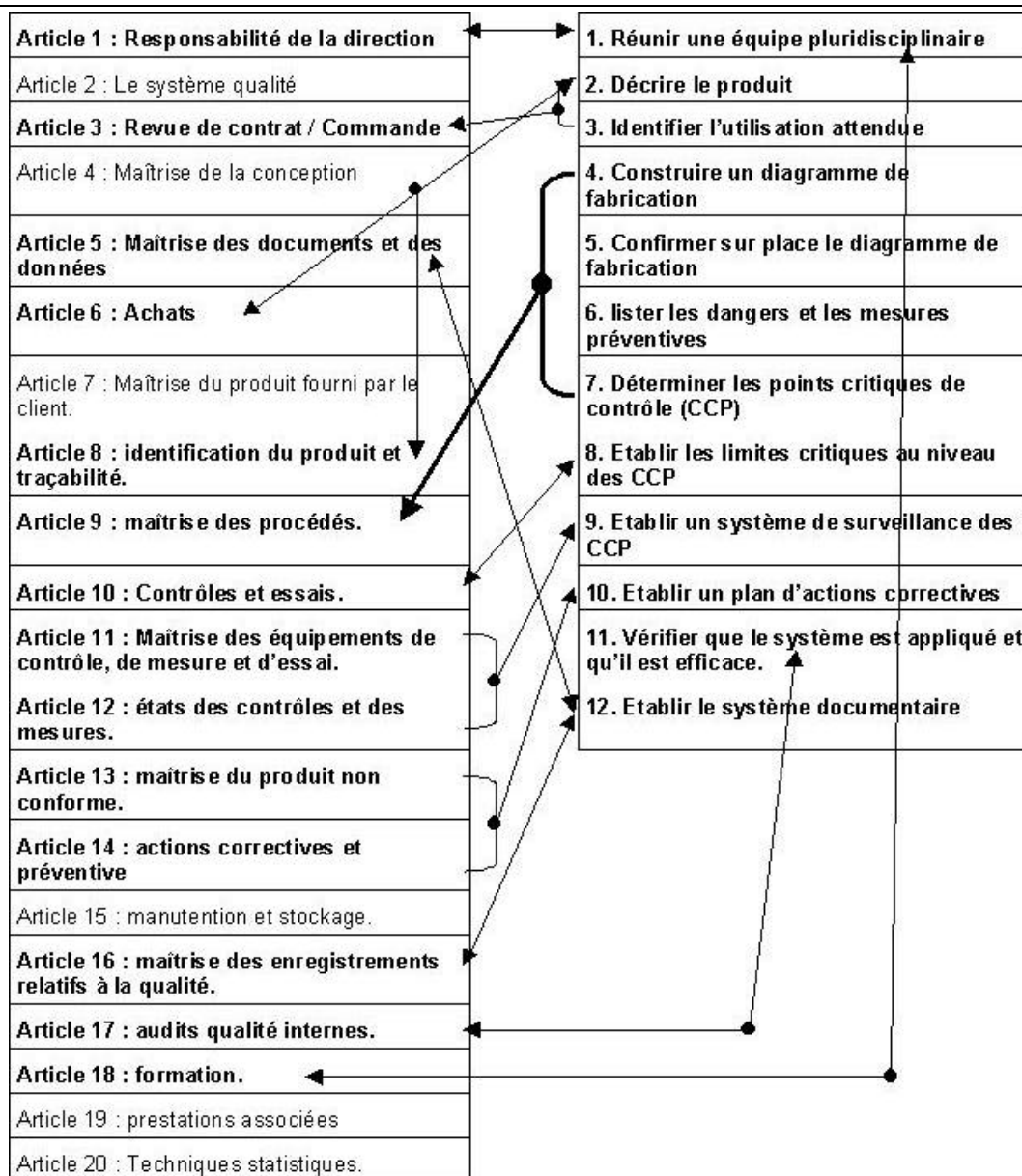
Cette notion intervient dans la première étape de la démarche concernant la constitution de l'équipe HACCP. La formation du personnel et en particulier de cette équipe est nécessaire si l'on souhaite que le système fonctionne correctement.

Article 19 : prestations associées

Cet article n'a pas raison d'être ni dans le cadre de l'HACCP, ni dans le cadre du compostage

Article 20 : Techniques statistiques.

L'entreprise doit identifier ses besoins en techniques statistiques pour établir, maîtriser et vérifier l'aptitude du process et les caractéristiques du produit, et mettre en place par écrit ces procédures. Ces mesures peuvent être intégrées au programme de surveillance des points critiques (Point 9 de la démarche HACCP) pour permettre l'interprétation et la diffusion des résultats.



Ce schéma présente l'ensemble des articles de l'ISO 9001 et les douze points du plan de travail HACCP puis établie les liens qui existent entre ces deux systèmes d'assurance qualité.