



anses

Enfouissement de cadavres issus d'animaux d'élevage ou de la faune sauvage

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Août 2021

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 6 août 2021

AVIS **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire** **de l'alimentation, de l'environnement et du travail**

**relatif à « l'évaluation du risque relatif à l'enfouissement de cadavres issus
d'animaux d'élevage et/ou de la faune sauvage »**

*L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.
L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.
Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.
Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L. 1313-1 du code de la santé publique).
Ses avis sont publiés sur son site internet.*

L'Anses a été saisie, en date du 17 janvier 2020, par la Direction générale de l'alimentation (DGAL), d'une demande d'avis sur l'évaluation du risque relatif à l'enfouissement de cadavres issus d'animaux d'élevage et/ou de la faune sauvage (saisine 2020-SA-0011).

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

L'évaluation demandée porte sur le risque de propagation de microorganismes potentiellement pathogènes, par les cadavres et les sous-produits d'animaux d'élevage ou de la faune sauvage, lors de leur stockage ou de leur enfouissement (en utilisant ou non de la chaux). Cette demande s'inscrit dans le cadre de la découverte de cadavres qui ne peuvent pas être collectés et/ou acheminés dans la filière de transformation des sous-produits animaux, ou dans celui de surmortalité importante :

- i. **dans un contexte sans cause infectieuse identifiée** (e.g. canicule, inondation). En effet, pendant les derniers épisodes de canicule en 2019-2020, les capacités des usines d'équarrissage ont été dépassées et ces dernières se sont trouvées dans l'incapacité de fonctionner normalement. Si un dépeuplement par abattage est planifié, les usines

d'équarrissage ont la capacité de s'organiser et de prendre en charge la transformation de tous les cadavres. Le contexte est différent en cas de canicule où beaucoup d'animaux meurent brutalement dans un laps de temps très court, sans planification possible. De plus, en cas de forte chaleur, les cadavres d'animaux laissés à température ambiante se dégradent très rapidement. C'est notamment le cas des cadavres de volailles, les cadavres se liquéfiant et devenant difficiles à manipuler et à transporter. Par ailleurs, les cadavres trop dégradés ne peuvent pas être éliminés au niveau d'une usine d'équarrissage, les matières trop liquides ayant tendance à bloquer le processus ;

- ii. **dans un contexte sanitaire défavorable.** Certains agents pathogènes¹ peuvent entraîner des mortalités importantes au sein d'un élevage ou même d'une filière de production. En plus des mortalités directes induites par l'agent pathogène, des mesures de dépeuplement peuvent également être instaurées afin de maîtriser la diffusion de l'infection (e.g. influenza aviaire ou fièvre aphteuse). Dans une telle situation, les capacités de traitement des usines d'équarrissage peuvent aussi être dépassées et nécessiter la mise en place de mesures alternatives de gestion des cadavres. Par rapport à la situation précédente (sans cause infectieuse particulière), le risque de diffusion de l'agent pathogène est à prendre en compte.

La formulation des questions a été discutée avec le demandeur le 18 décembre 2019 et le 25 mai 2020. Après ces discussions, les questions de la saisine sont les suivantes :

« **DANS UN CONTEXTE DE CANICULE OU D'INONDATION** (toute suspicion de cause infectieuse écartée) :

- **Identifier la cinétique de développement des microorganismes** (bactéries, virus, parasites, champ et levures, prions) lors de la décomposition de cadavres de suidés, volailles, ruminants domestiques, poissons d'élevages (notamment ceux présentant un risque de pathogénicité pour la faune domestique et/ou la faune sauvage)
 - effets des paramètres environnementaux (température, hygrométrie, UV, etc.)
 - variabilité de cette cinétique selon le stade de développement des animaux ou la quantité de cadavres.
- **Evaluer, les risques liés au stockage en surface** des cadavres, pendant un délai variable (48 h, une semaine, deux semaines, un mois) :
 - en élevage
 - en installation de stockage de déchets non dangereux (si elles sont autorisées pour recevoir des matières fermentescibles) ou en décharge (sans base réglementaire)
 - en usine de transformation ou centre de collecte (considérer les cadavres en état de décomposition très avancée).
- **Evaluer, en fonction des différentes modalités d'enfouissement, les risques de propagation de microorganismes pathogènes** de cadavres d'animaux d'élevage : sur le site de l'exploitation ou en installation de stockage de déchets non dangereux
 - considérer dans cette question la gestion des mortalités de poissons (de rivière ou d'élevage quand collecte impossible par exemple)
 - nécessité de la chaux, permet-elle de diminuer le risque, à quelles doses ? »

¹ Dans cet avis, le terme agent pathogène sera utilisé pour qualifier les agents infectieux pouvant avoir un impact négatif sur la santé des êtres humains et/ou des animaux, qu'ils soient domestiques ou sauvages.

EN CONTEXTE SANITAIRE DÉFAVORABLE, ÉVALUATION DU RISQUE DE PROPAGATION DE MICROORGANISMES PATHOGÈNES PAR ENFOUISSEMENT DE CADAVRES OU DÉCHETS DE VENAISON :

- « *Evaluer le risque de diffusion d'agents de maladies chroniques et/ou enzootiques et/ou aigues et/ou à plan d'urgence, aux animaux d'élevage (porcs, volailles, ruminants, poissons) en cas d'enfouissement de cadavres d'animaux d'élevage ou sauvages et/ou déchets de venaison.*
- *Indiquer les modalités d'enfouissement à préconiser.*
- *Indiquer si l'utilisation de chaux permet de diminuer ce risque à un niveau faible (estimation de la dose équivalent au poids du cadavre si possible) ».*

Après discussion avec le demandeur, des mortalités animales massives liées à des accidents chimiques n'ont pas été incluses dans le champ de la saisine.

Concernant l'enfouissement des déchets de venaison dans un contexte défavorable, cette question n'a pas pu être traitée par le groupe de travail (GT). En effet, cette question nécessite des recherches spécifiques, dans un contexte différent de celui d'un enfouissement massif d'animaux morts (y compris de la faune sauvage), suite à une épizootie : définition du déchet de venaison (s'agit-il essentiellement de viscères, ou faut-il prendre en compte du gibier entier ?), description et évaluation des différentes modalités de gestion des déchets de venaison par enfouissement en France, auditions de parties prenantes très différentes de celles réalisées, prise en compte de différents contextes sanitaires dans lesquels la question serait posée, etc. Cette question devra faire l'objet d'une saisine séparée.

Suite à une présentation des principaux résultats des travaux menés, la DGAL a demandé à l'Anses de prolonger le travail réalisé afin de proposer, en complément de l'avis et du rapport, « *un document d'aide à la décision des modalités de gestion des cadavres et déchets de venaison issus d'animaux d'élevage et/ou de la faune sauvage en fonction :*

- *des causes de mortalité,*
 - *des volumes concernés,*
 - *des espèces,*
 - *des conditions environnementales ambiantes (température, notamment) qui peuvent accélérer leur dégradation*
 - *de l'environnement de l'élevage ayant une forte mortalité (présence d'animaux de la même espèce ou d'autres espèce(s) au sein de l'élevage, zone dense en élevage, proximité d'autre(s) élevage (s), de riverains, de voies publiques, statut sanitaire environnant),*
 - *de la localisation géographique des cadavres,*
 - *du risque de dissémination d'un danger sanitaire via la faune sauvage en lien avec une "exposition" des cadavres,*
 - *du délai de mise en œuvre de l'enfouissement,*
 - *de tout autre élément que le groupe d'experts trouvera pertinent,*
- et en tenant compte de la localisation géographique des usines de transformation ».*

Cette attente complémentaire nécessite un complément d'expertise que l'Anses va mener. Ce complément, attendu pour décembre 2021, est de nature à conduire à la production d'un avis complété. Le dispositif d'aide à la décision qui sera proposé reposera sur les paramètres qui seront considérés par les experts comme pertinents.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

2.1. Organisation de l'expertise

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Santé et bien-être des animaux » (SABA).

L'Anses a confié l'expertise au GT « Enfouissement de cadavres d'animaux ». Les travaux ont été présentés au CES SABA tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques au cours des réunions des 8 janvier, 11 mai et 7 juin 2021. Ils ont été adoptés par le CES SABA le 8 juin 2021.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet : <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

2.2. Moyens mis en œuvre

➤ Audition des parties prenantes

Plusieurs auditions de professionnels ont été menées au cours de cette expertise :

- Des professionnels de l'équarrissage le 25 mai 2020.
- Un directeur de Centre de stockage de déchets ultimes le 16 juillet 2020.
- L'Union des producteurs de chaux a été sollicitée par mail.

➤ Recherche bibliographique

Une première recherche bibliographique approfondie a été réalisée en suivant une méthodologie de revue systématique de la littérature dans les moteurs de recherche Scopus® et Web of Science®, afin de recenser les connaissances scientifiques existantes sur l'utilisation de la chaux lors de l'enfouissement de cadavres d'animaux.

Une deuxième recherche bibliographique a été menée sur l'enfouissement des cadavres d'animaux. Plusieurs requêtes ont été réalisées dans Scopus®.

➤ Prise en compte de l'incertitude

Un recensement des principales sources d'incertitudes auxquelles l'expertise a été confrontée a été réalisé, en se basant sur la typologie et les recommandations proposées par le groupe de travail de l'Anses « Méthodologie en évaluation des risques » (GT MER).

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES SABA ET DU GT « ENFOUISSEMENT DE CADAVRES D'ANIMAUX »

Le CES SABA rappelle que le présent avis est associé à un rapport d'expertise collective qui développe l'ensemble de l'argumentaire des réponses aux questions posées par la saisine de la DGAL.

Afin de répondre aux nombreuses questions de la saisine, différents aspects ont été abordés lors de l'expertise collective selon le plan suivant : la gestion des cadavres en France hors situation de crise (en ou hors contexte microbiologique favorable), le processus de décomposition des cadavres et les évolutions microbiologiques *post mortem*, les différentes modalités de gestion des cadavres dans un contexte défavorable, l'intérêt de l'utilisation de la chaux lors de la gestion des cadavres et enfin les éléments généraux à prendre en compte lors de la gestion des cadavres en situation d'urgence (importance de l'anticipation, prise en compte des risques biologiques et chimiques avec respect des règles de biosécurité, traçabilité des sites d'enfouissement). Ces différents éléments sont représentés sur le schéma en Annexe 1 du présent avis.

3.1. Elimination des cadavres dans la filière classique

Lors de mortalité d'animaux d'élevage ou de la faune sauvage, la méthode d'élimination à privilégier est l'équarrissage même si ce choix dépend notamment de l'état de décomposition des cadavres et de leur accessibilité. Au titre de l'article L 226-2 du code rural et de la pêche maritime, « constituent une activité d'équarrissage la collecte, la manipulation, l'entreposage après collecte, le traitement ou l'élimination d'un ou plusieurs cadavres ou de parties de cadavres d'animaux ou d'autres matières animales. Ces divers sous-produits animaux sont ensuite transformés et valorisés ou éliminés ». Ces cadavres sont considérés selon le dispositif réglementaire en vigueur, comme des sous-produits animaux de catégorie 2 (C2) ou de catégorie 1 (C1)² selon les espèces concernées et/ou les substances qu'ils sont susceptibles de contenir.

Le cas des animaux domestiques ou d'élevage sera distingué de celui des animaux sauvages.

3.1.1. La collecte des cadavres

Chaque éleveur en France doit faire une demande d'enlèvement à l'équarrisseur dans un délai de deux jours francs (deux jours travaillés, déduction faite des week-ends et jours fériés), pour que le ou les cadavres soient enlevés.

La collecte est effectuée régulièrement dans les communes avec des camions dédiés, étanches, lavables et pouvant être désinfectés. Les matières sont ensuite regroupées dans les centres de collecte. De ces centres de collecte, les matières repartent en flux tendu (traitement des cadavres en 24 h), sans stockage particulier vers les usines de traitement dont le nombre est plus limité. Les huit usines présentes sur le territoire français traitent tous les

² Règlement (CE) N° 1069/2009 du Parlement Européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine et abrogeant le règlement (CE) N°1774/2002 (règlement relatif aux sous-produits animaux) – <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:300:0001:0033:FR:PDF> lien consulté le 30 avril 2021.

animaux morts collectés dans les élevages et traitent aussi, parallèlement à cela, des sous-produits animaux d'abattoirs de catégorie 1 et 2³ (C1/C2).

Pour les animaux domestiques, la prestation d'enlèvement et de traitement relève, selon les cas, de la collecte privée des animaux trouvés morts (animaux de compagnie) ou d'un service public (animaux d'élevage ou lots d'animaux de plus de 40 kg morts en exploitation).

L'Etat a la responsabilité de la collecte et de l'élimination des cadavres d'animaux de plus de 40 kg dont le propriétaire est inconnu ou inexistant⁴. C'est notamment le cas de l'animal sauvage libre qui a un statut *res nullius*. Il est pris en charge par le prestataire de la mission de service public de l'équarrissage.

3.1.2.Fonctionnement des usines d'équarrissage

A l'usine d'équarrissage, les matières sont traitées en continu pour obtenir des produits finis stabilisés : des graisses et des farines de viande et d'os qui vont être envoyées ensuite chez d'autres opérateurs. Après réception des matières dans un endroit clos, la première étape consiste en un broyage et un calibrage. La matière broyée est ensuite cuite (en général dans un bain d'huile). Les paramètres de cuisson (durée, température et pression) peuvent varier d'une usine à l'autre mais doivent respecter certains critères en fonction de la catégorie du sous-produit traité. L'eau contenue dans les matières est évaporée, re-condensée et traitée dans la station d'épuration de l'usine. Les matières restantes suite à cette cuisson sont un mélange de protéines (farines) et lipides (graisses).

Ces usines sont soumises à un agrément sanitaire au titre de la réglementation relative aux sous-produits animaux, les installations sont classées ICPE (installations classées protection de l'environnement) et les informations de collecte sont transmises par les équarrisseurs dans la base de données du système d'information de la DGAL (Sigal).

Concernant les différentes espèces animales traitées dans ces usines, les équarrisseurs ont indiqué lors de leur audition que les cadavres de bovins se dégradaient beaucoup moins vite au cours de leur stockage que ceux de volailles ou de porcs, qui vont rapidement se liquéfier. Ainsi, en cas de crise et d'afflux de cadavres d'animaux, la présence de nombreux cadavres de porcs ou de volailles posera davantage de problèmes au niveau du processus de traitement que les cadavres de bovins. Pour cette raison, en cas de mortalité élevée touchant plusieurs espèces, les usines sont susceptibles de hiérarchiser les collectes et de collecter en priorité les cadavres les moins impactant sur l'efficacité du processus (les cadavres de bovins seront collectés, au détriment des cadavres de volailles par exemple), ceci pouvant avoir des conséquences sanitaires non négligeables (voir paragraphe 3.4.2).

De même, les auditions ont révélé que l'application de chaux (vive ou éteinte) sur les cadavres en élevage pose problème. Outre la question de la sécurité des personnes assurant la collecte, plusieurs phénomènes physiques défavorables vont se produire : la température des bennes peut rapidement monter; à l'usine, le mélange chaux et graisse va déclencher une réaction de

³ Les sous-produits animaux de catégorie 1 (C1) sont, soit des sous-produits susceptibles de contenir des substances illégales, des contaminants chimiques, des protéines prions pathogènes ; soit des cadavres d'animaux de compagnie, d'animaux détenus en parc zoologique, ou encore d'animaux sauvages. Ils ne peuvent faire l'objet que d'une valorisation énergétique comme combustible ou biocarburant par exemple.

Les sous-produits animaux de catégorie 2 (C2) peuvent être valorisés en fertilisation ou encore biocarburants. Ils ne peuvent pas être utilisés en alimentation animale.

⁴ Article L. 226-1 du Code Rural et de la pêche maritime (CRPM).

saponification, la matière va mousser, rendant la déshydratation inopérante et le processus sera bloqué.

Pour éviter ces problèmes, en cas d'allongement du délai de collecte, les équarrisseurs ont, au cours de leur audition, préconisé de stocker les cadavres à l'ombre dans les bacs d'équarrissage, de les protéger par de la paille humide (plutôt que sous des bâches plastiques), de les stocker dans des remorques ou dans des congélateurs ou chambres froides. Il est à noter que le stockage des cadavres dans les centres de collecte ou à l'usine n'est pas prévu dans le processus car les jus générés en cas d'excès de cadavres sont difficilement traités dans le processus de l'usine d'équarrissage.

En cas de dépassement des capacités des usines d'équarrissage, le fonctionnement en réseau des usines permet dans un premier temps de délester une partie des cadavres et sous-produits à traiter entre les usines existantes. Si cela s'avère insuffisant, il est possible dans un second temps de solliciter des centres de stockage des déchets ultimes (« CSDU »).

3.1.3. Fonctionnement des centres de stockage de déchets ultimes

Les « CSDU » servent à stocker les déchets ultimes, c'est-à-dire ceux dont la part valorisable a déjà été extraite et ceux qui ne peuvent pas être valorisés dans des conditions techniques et économiques acceptables. Il s'agit des déchets industriels banals, des ordures ménagères non valorisables, des boues de station d'épuration, etc. L'enfouissement consiste dans ce cas à stocker les déchets dans des conditions contrôlées réglementairement afin de maîtriser leur impact sur l'environnement au regard du niveau des dangers associés aux déchets⁵. Un site enfouit environ 100 000 t par an. L'acheminement des déchets est sous-traité.

La gestion des lixiviats⁶ et des eaux (de ruissellement, de pluie ou apportées par les déchets) sur le site est totalement contrôlée. Des analyses physicochimiques et bactériologiques sont faites régulièrement sur les lixiviats⁷.

De l'audition, il ressort que :

- Les « CSDU » ont l'habitude de gérer les matières organiques avec la problématique des agents pathogènes qui pourraient être présents dans les déchets ménagers.
- La part des animaux morts et sous-produits animaux ne représente qu'une partie infime de ce qui est reçu dans un « CSDU » : il est arrivé suite à un épisode de canicule ou une épizootie, que des animaux morts soient pris en charge par les « CSDU », les quantités enfouies pouvant aller de quelques tonnes à 150/200t. La réception et la gestion de cadavres d'animaux en « CSDU » est soumise à une autorisation des services de l'Etat en charge de l'environnement. Dans ce cas, le site d'enfouissement met en place un sarcophage au niveau d'un casier⁸ permettant de vider rapidement les camions en limitant

⁵ On distingue trois classes de « CSDU » (dénomination ancienne) : les installations de stockage de déchets dangereux (ISDD), non dangereux (ISDND) et inertes (ISDI) dont les exigences techniques sont adaptées aux types de déchets à recevoir. **Dans les présents avis et rapport d'expertise associé, la description faite est celle des ISDND (anciennement CSDU de classe 2).**

⁶ Les lixiviats correspondent aux liquides, contenant de l'eau, des protéines, des matières grasses, des sels minéraux et des glucides, et parfois des microorganismes pathogènes ou des produits chimiques s'écoulant des corps en décomposition.

⁷ Arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000032275960> lien consulté le 31 mai 2021.

⁸ Le « CSDU » est composé de casiers, indépendants sur le plan hydraulique, eux-mêmes composés d'alvéoles, dans lesquelles sont entreposés les déchets.

au maximum les interactions entre le personnel et les cadavres. Le fait d'enfouir des cadavres sur ce type de site étant exceptionnel, il n'y a pas de zone prévue à l'avance à cet effet : tout est préparé à la demande. Il s'agit d'un travail de terrassement auquel les employés de ces structures sont habitués. La taille du sarcophage nécessaire dépend de la quantité de cadavres à gérer et aura un impact en termes de délais de réalisation. Une problématique pourrait apparaître si de grandes quantités (> 200/300 t) devaient être enfouies car la zone du casier serait bloquée sur une durée d'une ou deux semaines car le casier ne pourrait plus servir à la prise en charge d'autres déchets. De plus, l'enfouissement de grandes quantités de cadavres en urgence nécessiterait de mobiliser en supplément des engins (camions et pelleteuses) et du personnel (en particulier le week-end car les sites sont fermés). Sauf situation de crise identifiée par la préfecture, il serait en effet impératif de maintenir l'activité normale du site car les autres déchets continuent d'y être déposés.

- La pratique du chaulage des cadavres sur le site de l'élevage avant enlèvement semble moins problématique pour les « CSDU » que pour les usines d'équarrissage, mais nécessite tout de même le respect d'un délai entre l'application de chaux et le dépôt des cadavres au « CSDU », pour limiter les conséquences liées au dégagement de chaleur, notamment pour les travailleurs et les risques d'incendie.

3.2. Décomposition des cadavres et évolution microbiologique post mortem

La décomposition d'un cadavre est un phénomène naturel et éphémère, qui génère de l'énergie, des nutriments et des échanges d'énergie au sein de l'écosystème. Elle a donc un impact sur l'environnement et sur la biodiversité des écosystèmes terrestres puisque les cadavres sont des habitats spécifiques et/ou des ressources pour de nombreuses espèces de microorganismes, d'insectes (mouches, coléoptères) et d'espèces végétales pionnières.

Le nécrobiome⁹ évolue au cours du processus de décomposition. Les taxons se succèdent au cours du temps selon les nutriments disponibles, la nature du sol, l'environnement du cadavre (eau, terre, etc.) ou d'autres paramètres physico-chimiques (humidité, température, pH). Les changements dans la composition de la communauté microbienne varient selon les études, dont les résultats semblent parfois contradictoires. Il ressort néanmoins que les groupes bactériens qui prédominent sont les *Proteobacteria* qui précèdent les *Firmicutes*.

Les agents pathogènes ne peuvent en général plus se multiplier dans les cadavres, à l'exception de certains agents présentant des formes de résistance dans le milieu extérieur particulièrement élevée (spores, protéines prions). Pour les autres, leur quantité diminue au cours du temps du fait de phénomènes de compétition, de la modification du milieu ou encore de la synthèse par le nécrobiome de substances néfastes pour leur survie.

La décomposition des cadavres, qu'ils soient enfouis ou en surface, est un processus complexe, sur lequel de nombreux facteurs ont un impact, les principaux étant les facteurs exogènes :

- ✓ l'accessibilité des charognards ou des insectes au cadavre accélère le processus de décomposition ;

⁹ Écosystème *post-mortem* (i.e. propre au cadavre) composé de microorganismes, d'arthropodes et de vertébrés qui interagissent entre eux et participent à la décomposition du corps

- ✓ la température influence l'activité des microorganismes : dans une gamme de températures ambiantes conventionnelles (i.e. allant de - 20°C à + 50°C) des températures froides, notamment proches de 0°C ou négatives, ralentissent ou arrêtent les processus de décomposition tandis que la chaleur a tendance à les accélérer ;
- ✓ la présence d'oxygène, de par son impact sur les microorganismes et les processus métaboliques impliqués, constitue un paramètre fondamental de la cinétique de décomposition. Ainsi, un environnement oxygéné favorise le taux de décomposition. Par ailleurs, de manière qualitative, les microorganismes et voies métaboliques étant différents selon la présence ou non d'oxygène, les produits de décomposition sont également différents ;
- ✓ les pH extrêmes ont un impact négatif sur la survie et l'activité des agents microbiologiques impliqués dans la décomposition (à pH >10, l'impact négatif sur les communautés microbiennes est très fort).

Les facteurs endogènes ont également un impact mais celui-ci est négligeable au regard des facteurs cités précédemment. Selon des observations de terrain, les petits cadavres se décomposent plus rapidement que ceux des grands animaux (e.g. dégradation rapide des cadavres de volailles ou de poissons par rapport aux cadavres de bovins).

Tous ces facteurs interagissent entre eux et il est difficile de mesurer l'impact d'un facteur indépendamment des autres. Il ressort cependant que le fait d'enfouir un cadavre (profondeur d'enfouissement > 1 m) va rapidement le soustraire à certains facteurs favorisant la décomposition (charognards, insectes, oxygène), ce qui aboutit à un ralentissement du processus de décomposition ainsi qu'à une modification des voies métaboliques empruntées. Certaines conditions (froid, humidité) stoppent les processus de putréfaction et de décomposition en entraînant la formation d'adipocire¹⁰. De la même manière, des conditions propices à la dessiccation (atmosphère sèche, air chaud et ventilation) peuvent entraîner une momification du cadavre (mais de telles conditions ne se rencontrent pas lors de l'enfouissement des cadavres).

3.3. Analyse et description des modalités de gestion des cadavres en cas de circonstances exceptionnelles, contraintes et risques associés

En cas de circonstances exceptionnelles entraînant une accumulation de cadavres sur un site ou en cas d'impossibilité de passage de l'équarrisseur ou de traitement à l'usine, il convient d'éliminer les cadavres en tenant compte à la fois des contraintes techniques et des risques sanitaires et environnementaux. Les cadavres peuvent être stockés temporairement sur le site avant d'être acheminés et éliminés dans les centres d'équarrissage ou en « CSDU », ou gérés sur place ou sur un terrain communal dédié, de manière définitive, par différentes méthodes.

Dans cette partie, sont recensées des pratiques qui ont été mises en œuvre en France ou dans d'autres pays pour gérer les mortalités de masse. Les informations proviennent à la fois d'articles scientifiques et de nombreux documents de retours d'expérience, guides de bonnes pratiques, etc.

¹⁰ Savon ammoniacal résultant de l'altération des lipides au cours de la décomposition cadavérique (gras des cadavres), souvent observé au cours des submersions prolongées ou après inhumation dans une terre humide et froide. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/adipocire/1081> lien consulté le 5 février 2021.

3.3.1. Stockage temporaire des cadavres sur site avec élimination vers les usines d'équarrissage

En cas de mortalité, les éleveurs peuvent être amenés à déposer les cadavres au sol, à l'air libre, notamment quand il n'existe pas de systèmes de stockage hors sol (bac réfrigéré, chambre froide, etc., généralement adaptés aux espèces de petite taille : volaille, porcelet, poisson). Dans les guides de bonnes pratiques des professionnels, il est généralement recommandé de les déposer sur une dalle bétonnée et dans une enceinte fermée grillagée (protection sanitaire contre les nécrophages) et cette zone de stockage doit être la plus éloignée possible de l'élevage. Ce mode de stockage peut générer des lixiviats, des aérosols, des nuisances olfactives ou liées à la présence d'insectes et les cadavres peuvent faire l'objet de nécrophagie. Les espèces nécrophages peuvent être domestiques (chat, chien) ou sauvages. De plus, certains procédés (dispositions des cadavres sous bâches ou sous cloches) accélèrent la décomposition et nuisent donc au processus de l'équarrissage.

Il existe des procédés permettant de stocker et de stopper la décomposition des cadavres avant leur collecte : e.g. la fermentation, la conservation acide et la réfrigération ou la congélation des cadavres. Ces méthodes n'éliminent pas les cadavres, mais permettent un stockage à court terme avant leur prise en charge par l'équarrissage. Leur intérêt est discutable, dans la mesure où elles ne permettent de stocker que quelques centaines de kilo de cadavres à la fois et qu'elles nécessitent pour certaines des installations et équipements particuliers, dont la disponibilité est incertaine en France.

3.3.2. Enfouissement définitif en profondeur des cadavres sur le site de l'exploitation ou sur un terrain communal dédié

L'enfouissement sur le site de l'élevage ou sur un terrain communal dédié consiste à placer les cadavres dans une fosse préalablement creusée et à les recouvrir avec la terre excavée. Ce mode d'enfouissement doit prendre en compte les caractéristiques du sol et du site : topographie, propriété hydrogéologique, proximité de l'eau (surface ou souterraine), lieux publics (lieux habités, terrains militaires, sites archéologiques, bâtiments d'élevage, etc.), accessibilité au site et utilisation future du site. Cette technique est notamment possible lorsque la nappe phréatique est profonde et le type de sol imperméable.

La législation liée à l'enfouissement de cadavres d'animaux est fixée par les articles L226-1 à L226-8 du CRPM. De manière générale, l'enfouissement de cadavres est interdit quel que soit leur poids. Il peut néanmoins être autorisé en cas d'urgence par arrêté municipal ou préfectoral ou encore par le ministre de l'agriculture en cas d'épizootie. Néanmoins, le choix des sites d'enfouissement doit respecter certaines contraintes réglementaires : le site d'enfouissement doit être situé à une distance d'au moins 100 mètres des habitations environnantes et des cours d'eau (article R223-5 du CRPM), et doit également être entouré d'une clôture pour en empêcher l'accès. Il est demandé de faire appel à un hydrogéologue avant de définir précisément le site d'enfouissement.

Cette méthode comporte des avantages : gestion d'un grand nombre de cadavres, rapidité et simplicité de mise en œuvre s'il existe une autorisation préalable, pas de transport des cadavres si l'enfouissement a lieu sur le site de l'élevage. Bien que l'enfouissement en profondeur ne produise pas de chaleur, la compétition avec d'autres organismes et le processus de décomposition inactivent un certain nombre d'agents pathogènes.

Pour autant, il ne s'agit pas d'une zone confinée, et les lixiviats générés par le processus de décomposition anaérobie des cadavres, dont une partie est susceptible d'être produite rapidement au cours du processus de décomposition, pénètrent dans le sol et peuvent atteindre une éventuelle nappe phréatique. Cette méthode présente également d'autres inconvénients tels que le traitement des gaz qui est à prévoir, la traçabilité, le suivi et la limitation d'utilisation future du site, l'acceptabilité par les riverains.

3.3.3.Utilisation de la chaux

De la revue bibliographique approfondie réalisée sur l'utilisation de la chaux lors de l'enfouissement de cadavres d'animaux, il ressort les éléments suivants :

- Peu d'études menées sur des cadavres entiers rapportent les effets de la chaux, sur la décomposition ou l'assainissement (inactivation d'éventuels agents pathogènes) des cadavres et/ou des sites de leur stockage ou d'enfouissement. Il résulte de ce manque de données, des recommandations d'usage diamétralement opposées selon les documents considérés, en France comme à l'international. Les effets de la chaux (vive ou éteinte) sur les cadavres enterrés restent donc globalement très mal connus.
- Les études de laboratoire indiquent que, hors enfouissement et en conditions aérobies, la chaux vive peut accélérer le processus de décomposition dans un premier temps. En revanche, dans les études d'enfouissement à court terme (quelques mois) et à plus long terme (plus d'un an), c'est plutôt un ralentissement de la décomposition qui est observé, aussi bien pour la chaux vive que pour la chaux éteinte. Il est probable que ce ralentissement soit dû, au moins en partie, à la perturbation des communautés microbiennes normalement impliquées dans le processus de décomposition. Il convient de noter qu'après plusieurs années d'enfouissement, les cadavres finissent par se « squelettiser » quelles que soient leurs conditions d'enfouissement, avec ou sans chaux.
- L'effet biocide de la chaux (vive ou éteinte) est largement démontré en conditions de laboratoire. En revanche, sa capacité à assainir des cadavres stockés ou enfouis et à empêcher la diffusion d'agents pathogènes à partir de sites de stockage ou d'enfouissement est incertaine. Cette capacité est probablement très dépendante de l'espèce animale et de la quantité de la nécromasse à traiter, ainsi que des conditions environnementales lors de l'application (types de sol, humidité, etc.).

3.3.4.Compostage des cadavres sur le site de l'exploitation

Le compostage est un processus biologique naturel de décomposition de matières organiques dans un environnement à prédominance aérobie. Pendant le processus, les bactéries, champignons et autres microorganismes décomposent les matières organiques en un mélange stable (compost pouvant servir d'amendement des sols) tout en consommant de l'oxygène et en libérant de la chaleur, de l'eau, du dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres gaz. Quatre variables sont considérées comme essentielles à un compostage réussi : (1) la teneur en humidité (40 à 60 %), (2) la température (45 à 60°C), (3) la concentration d'oxygène (niveau souhaitable de 10 %) et (4) le rapport carbone : azote (C:N) (plage souhaitable de 20:1 à 30:1) Le compostage de cadavres d'animaux n'est pas autorisé en Europe sur le site de l'exploitation.

Un traitement très proche du compostage mais sans finalité d'amendement des sols est autorisé en Europe et en France, il s'agit d'une méthode de confinement (Règlement 142/2011/CE Annexe IX chap. V) consistant en une maturation aérobie et entreposage des porcs morts pouvant s'effectuer dans le cadre d'un agrément sanitaire. Dans ce cas, les produits ne peuvent être destinés qu'à une usine d'incinération ou de coïncinération. « Cette méthode n'est applicable qu'à l'élimination d'animaux de l'espèce porcine provenant de la même exploitation, pour autant que celle-ci ne fasse pas l'objet de restrictions motivées par un foyer suspecté ou confirmé d'une maladie transmissible grave chez lesdits animaux, ou d'animaux ayant été abattus à des fins de lutte contre une telle maladie » (point 2 du A de la section 2 du chapitre V de l'annexe IX du R 142/2011).

Dans le rapport d'expertise et le présent avis, il ne sera question que du compostage de cadavres sur le site de l'exploitation tel que pratiqué en Amérique du Nord.

Plusieurs études indiquent que le compostage est efficace pour éliminer la plupart des agents pathogènes infectieux endémiques des volailles et des suidés. Le compostage à grande échelle s'est montré très efficace en Amérique du nord lors d'épizooties dues aux virus influenza aviaire. Selon ces études, le compostage serait moins susceptible d'affecter les eaux souterraines ou de surface qu'un enfouissement. Cependant, il existe peu d'informations sur le devenir des prions ou des bactéries sporulantes telles que *Bacillus anthracis* lors du compostage de cadavres. Cette modalité comporte certains avantages : possibilité de mise en place rapide sur le site d'élevage, élimination d'un grand nombre d'agents pathogènes. Cependant, elle présente également des inconvénients : processus lent et coûteux, nécessitant un suivi au démarrage et dépendant de la technicité des opérateurs, génération d'odeurs ou contamination du sol en cas de mauvaise gestion, manipulation des cadavres.

3.3.5. Recouvrement des cadavres sur site

Le recouvrement en surface est une méthode hybride entre l'enfouissement en profondeur et le compostage des cadavres. Cette méthode est facile à mettre en place et peu coûteuse, entraînant moins de nuisances olfactives que le compostage. Cependant, elle offre un accès possible aux charognards et peu d'éléments scientifiques sont disponibles concernant cette modalité de gestion des cadavres, notamment sur l'inactivation d'agents pathogènes.

3.3.6. Autres modalités de gestion des cadavres sur site

L'incinération correspond à la combustion des cadavres d'animaux, de sorte que les produits finaux qui en résultent soient la chaleur, les émissions gazeuses et les cendres résiduelles. Trois types d'incinération sont possibles : l'incinération en installation fixe, l'incinération par rideau d'air¹¹ et l'incinération en plein air.

En général, l'incinération complète détruit les agents pathogènes (les bactéries et les virus, y compris les spores persistantes telles que celles de *B. anthracis*) à l'exception des prions. Les principaux inconvénients concernent l'incinération en plein air : nécessité de conditions

¹¹ La caractéristique principale de l'incinération par rideau d'air est un « rideau » d'air à grande vitesse produit par un ventilateur au-dessus d'une chambre de combustion hors sol ou dans une tranchée de brûlage en terre. Le rideau d'air sert à contenir la fumée et les particules dans la zone de combustion et fournit un meilleur débit d'air et donc un meilleur apport en oxygène, permettant d'atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1 000°C) et une combustion plus rapide et plus complète.

météorologiques favorables, potentiel de pollution de l'environnement, mauvaises odeurs et perception négative du public. Une analyse détaillée des avantages et inconvénients figure dans le rapport.

Il existe d'autres techniques (hydrolyse alcaline, digestion anaérobie, gazéification) mais leur efficacité a été démontrée uniquement lors d'essais de laboratoire et ces méthodes ne sont pas réalisables sur le terrain actuellement.

3.3.7.Principes généraux d'organisation sur le site d'enfouissement

■ L'anticipation, une étape indispensable

Quelle que soit la (ou les) méthode(s) retenue(s), les modalités d'élimination (ou de traitement) des cadavres devront être précisées dans un arrêté préfectoral.

Dans tous les cas, il est essentiel de privilégier la rapidité d'intervention, car tout retard peut représenter un facteur supplémentaire de risque de diffusion d'agents pathogènes aux exploitations voisines et éventuellement à la faune sauvage environnante, et/ou entraîner une liquéfaction des cadavres. Il est donc nécessaire d'anticiper au maximum afin d'assurer la prise en charge des cadavres la plus rapide et efficace possible, particulièrement en situation de crise sanitaire.

La pré-identification des sites constitue un pré-requis indispensable afin que cette étape ne devienne pas un point de blocage.

Certaines opérations peuvent nécessiter la mobilisation de moyens humains et matériels extérieurs à la DDETSPP (Direction départementale de l'emploi, du travail, des solidarités et de la protection des populations). Il convient d'anticiper ces besoins en amont, et notamment d'identifier, avec l'aide du service interministériel de défense et de protection civile de la Préfecture, et, dans le cadre de la préparation des PNISU (Plan National d'Intervention Sanitaire d'Urgence), les partenaires éventuels, publics ou privés, à solliciter pour les sensibiliser à l'importance de leur rôle. La mise en place de conventions ou la passation de marchés peut être nécessaire.

De plus, il conviendrait d'avoir connaissance *a priori* des capacités de prise en charge des cadavres (usines d'équarrissage et moyens de transport) et d'avoir identifié les situations pour lesquelles un transport est envisageable ou non (en cas de maladie due à certains dangers sanitaires, il peut être préférable de ne pas déplacer les cadavres et d'opter pour une méthode de gestion sur le site d'élevage).

■ Les risques pour les opérateurs et les mesures de biosécurité à mettre en œuvre

Tout le personnel intervenant dans la gestion des cadavres doit être préalablement formé spécifiquement aux tâches à accomplir et au respect des mesures d'hygiène et sécurité, pour leur propre sécurité mais aussi pour minimiser les risques de diffusion des agents infectieux. Des mesures de biosécurité doivent donc être mises en œuvre afin d'éviter toute dissémination d'agents pathogènes aux élevages et autres animaux et/ou êtres humains à proximité. Ces mesures de biosécurité comprennent notamment une protection et une délimitation du site, la protection des personnes par des tenues spécifiques, l'utilisation de matériel ou véhicule rigoureusement nettoyés et désinfectés après l'opération. Par ailleurs, en cas de mortalités associées à des agents infectieux ayant des propriétés de résistance et de dissémination particulières, des précautions seront à considérer selon les recommandations spécifiques en cas de maladies réglementées.

■ Les risques chimiques liés à l'enfouissement de cadavres

Des molécules thérapeutiques peuvent être présentes dans les cadavres et diffuser lors de leur décomposition dans le sol, voire contaminer des nappes phréatiques. Ces molécules, comprenant essentiellement les antibiotiques, les antiparasitaires (dont les anticoccidiens chez les volailles) ou les antifongiques sont à l'origine de différents risques, aussi bien pour le sol que pour les plantes ou les manipulateurs de cadavres. Cependant, peu d'informations sont disponibles dans la littérature concernant ces risques véhiculés par les cadavres. Les études disponibles sur la présence de ces produits dans les cadavres des animaux et au niveau des fosses d'enfouissement concernent essentiellement les antibiotiques. Les risques associés aux antibiotiques sont liés à la toxicité propre des molécules, pour les plantes par exemple. Ces risques sont aussi liés à leur effet sur l'environnement, en entraînant la sélection de germes résistants dans l'environnement à partir des lixiviats contaminés ainsi que la libération de gènes de résistance pouvant être transférés aux bactéries environnementales. La présence d'antibiotiques dans des lixiviats et les sols adjacents peut ainsi constituer une menace potentielle pour la qualité des eaux souterraines. Il faut toutefois noter que si l'introduction d'antibiotiques dans le sol *via* l'enfouissement de cadavres d'animaux récemment traités est à considérer, son importance relative par rapport à d'autres pratiques, par exemple l'épandage des effluents d'élevage (fumiers, lisiers) est probablement faible.

■ La traçabilité des sites d'enfouissement

Le suivi dans le temps (traçabilité) des sites d'enfouissement constitue un enjeu majeur. Du fait même de sa nature, l'enfouissement laisse peu de traces visibles dès lors que la végétation a repoussé. Ce recouvrement végétal peut même être accéléré par l'enrichissement des sols en matière organique. A plus long terme, la traçabilité paraît aussi nécessaire pour toute activité nécessitant de creuser dans le sol : aménagements, construction de nouveaux bâtiments, etc.

Il apparaît donc impératif de maintenir non seulement une traçabilité dans le temps des sites d'enfouissement, mais également de signaler très clairement par un affichage bien visible sur site d'éventuelles restrictions d'accès pour raisons sanitaires.

3.4. Conclusions et réponses aux questions de la saisine

3.4.1. Cinétique de décomposition des cadavres

La plupart des études identifiées dans la recherche bibliographique ont été menées afin de répondre à des objectifs ne relevant pas directement du champ couvert par les questions de la saisine. Aussi, les éléments de réponse quant au processus de décomposition des cadavres d'animaux et à l'impact de différents facteurs sur celui-ci, restent-ils parcellaires. Pour autant, certains éléments peuvent être soulignés.

La décomposition est un processus complexe reposant en grande partie sur l'activité de microorganismes et dépend de nombreux facteurs, notamment les facteurs exogènes. Ainsi, l'accessibilité des charognards ou des insectes nécrophages au cadavre, la température, l'humidité, la présence d'oxygène, ou encore le pH ont un effet majeur sur le processus de décomposition. Les facteurs endogènes (taille du cadavre, statut physiologique, espèce animale) ont aussi un effet mais celui-ci paraît négligeable par rapport aux facteurs exogènes

mentionnés auparavant. Des petits cadavres se décomposent plus rapidement que ceux des grands animaux, ce qui correspond aux observations de terrain (dégradation rapide des cadavres de volailles ou de poissons par rapport aux cadavres de bovins) mais cette cinétique reste difficilement quantifiable. En effet, l'impact de la taille ou de la masse individuelle des cadavres sur le taux de décomposition a été étudiée par un certain nombre d'équipes, avec des effets parfois contradictoires observés, certains auteurs indiquant que les cadavres de petite taille étaient décomposés plus rapidement tandis que d'autres démontrent l'inverse. L'impact de la taille individuelle n'est donc pas clair, sans doute du fait des interrelations existantes avec d'autres facteurs.

Les retours d'expérience sur des enfouissements de masse indiquent que l'accumulation d'un nombre élevé de cadavres enfouis en profondeur semble induire des conditions défavorables à la décomposition, et augmenterait le temps nécessaire à son achèvement mais il est difficile de préciser l'impact du seul paramètre quantité de cadavres car l'accumulation de ceux-ci modifie les facteurs exogènes : la disponibilité en oxygène sera limitée par le tassement par exemple.

Les agents pathogènes ne peuvent en général plus se multiplier dans les cadavres et leur quantité diminue au cours du temps du fait de phénomènes de compétition pour les ressources nutritionnelles, de la modification du milieu ou encore de la synthèse de substances néfastes pour leur survie par certaines espèces présentes dans le nécrobiome. Ainsi, quelle que soit l'espèce animale, les agents infectieux ne présentant pas de forme de résistance particulière (spores, protéines prions) disparaissent au cours du processus de décomposition en un temps variable selon les conditions. En cas de mortalité liée à des agents pathogènes particulièrement résistants ou diffusibles, ou de possibilité d'un portage asymptomatique d'agents bactériens qui pourraient sporuler, il convient de prendre en considération les propriétés de ces agents afin d'évaluer au cas par cas la survie et la durée de persistance de ces agents dans les cadavres et leur environnement.

3.4.2. Stockage temporaire en surface des cadavres

Le stockage de cadavres d'animaux à l'air libre est une pratique qui n'est *a priori* observée que sur les sites d'élevage. En effet, que ce soit en « CSDU », ou encore en usine d'équarrissage, aucun stockage temporaire en surface n'est effectué.

Des cadavres laissés en libre accès dans l'environnement constituent une source attractive de nourriture pour certaines espèces d'insectes ou de vertébrés nécrophages (dont des mammifères carnivores ou des oiseaux) qui chercheront rapidement à accéder aux cadavres. Les mouches sont par exemple capables de localiser un cadavre en quelques minutes et peuvent se déplacer sur plusieurs kilomètres pour y accéder. Leur comportement ubiquiste et leur très grande capacité de dispersion en font des vecteurs passifs potentiels d'agents infectieux qui pourraient être présents sur un cadavre.

De plus, les nécrophages participent à la décomposition des cadavres et accélèrent le processus de décomposition, ce qui aura pour effet :

- d'impacter les opérations de collecte et de transformation des cadavres à l'usine d'équarrissage. Si les cadavres sont trop liquéfiés, les capacités de traitement seront ralenties, voire complètement arrêtées. Il peut alors être préférable de ne pas collecter ces cadavres ou de les acheminer directement en « CSDU »;

- de favoriser et accélérer les écoulements de lixiviats dans l'environnement proche *via* les brèches formées par les nécrophages.

En outre, ces espèces nécrophages s'exposeront aux différents microorganismes présents dans les cadavres, dont certains sont susceptibles d'être néfastes pour leur santé, et ce, même si la mortalité massive n'est pas liée à une cause sanitaire (des microorganismes peuvent avoir des relations de mutualisme ou de commensalisme avec certaines espèces mais être pathogènes pour d'autres).

Sur le terrain, il est observé que les cadavres d'espèces de petite taille (volailles, poissons) se décomposent plus rapidement que les cadavres d'animaux de grande taille. Une particularité des piscicultures en eau douce mérite d'être abordée : en cas de mortalité importante dans un bassin ou un élevage (e.g. suite à une pollution, baisse du niveau d'eau ou bien un orage, la foudre pouvant frapper à proximité des bassins et tuer de nombreux animaux), les poissons commencent à se décomposer dans le bassin. Des contaminations des cours d'eau peuvent alors avoir lieu si les animaux ne sont pas éliminés rapidement. Il pourrait être pertinent de prendre en compte ce risque de déversement dans les cours d'eau (liés à la structure du site et de l'implantation des bassins) dans la priorisation des collectes à effectuer, en cas de crise affectant plusieurs espèces animales.

Si une cause infectieuse est suspectée ou identifiée, il conviendra de prendre en compte les caractéristiques de l'agent incriminé (capacité de résistance, doses infectieuses, voies de transmission, etc.) pour évaluer la persistance et le risque de propagation à partir des cadavres stockés en surface. En outre, il convient notamment d'évaluer le risque de contamination croisée et de diffusion d'agents pathogènes à d'autres productions animales sur le site *via* les dispersions par aérosol, par écoulement, par des animaux nécrophages ou encore par des supports contaminés comme les bottes ou du matériel).

Pour toutes ces raisons, les experts recommandent de ne pas recourir au stockage en surface de cadavres, en particulier pour les espèces à décomposition rapide (volailles, poissons).

Pour autant, si cette pratique devait être mise en œuvre (notamment pour les bovins, ou porcins de grande taille), les experts suggèrent de prendre en compte les éléments suivants :

- quelle que soit la situation, ce stockage devrait toujours être effectué sur la période la plus courte possible et pas au-delà de 48 heures. Si les cadavres atteignent un état de décomposition avancée, ils posent problème à plus d'un titre : contamination locale *via* les lixiviats produits, collecte plus difficile et risque de ralentissement ou de blocage du processus de transformation à l'usine d'équarrissage ;
- au niveau de l'élevage, il serait souhaitable de penser à l'avance au lieu de stockage le plus adapté pour limiter au maximum les risques sanitaires et environnementaux. Une attention particulière sera portée sur les possibilités de nettoyage et de désinfection du lieu de stockage et du matériel, la gestion des contaminations croisées avec d'autres productions animales, et la protection vis-à-vis des contacts avec les autres animaux domestiques ou sauvages ;
- le stockage en bâtiment ou dans un local clos peut-être envisagé afin de limiter l'accès aux espèces nécrophages ou autres animaux de l'exploitation (chiens par exemple), la transmission d'agents infectieux à transmission aérienne, et l'exposition à des températures élevées qui risqueraient d'accélérer le processus de décomposition des cadavres. Il est rappelé que ce stockage, même en bâtiment, doit être le plus court

possible afin que les composés organiques volatils n'aient pas le temps de se former et de s'accumuler (ce qui pourrait entraîner des nuisances olfactives, mais aussi la formation de gaz irritants voire toxiques). Sur le continent nord-américain, le stockage de cadavres en bâtiments est une pratique courante et constitue même parfois une première étape de compostage. Il pourrait être envisagé de recourir à une pratique de maturation aérobie analogue, avant que les cadavres soient collectés pour un envoi en usine d'équarrissage (en particulier dans un contexte sanitaire favorable) ;

- déposer les cadavres sur une bâche ou sur une couche de paille ou de végétaux humides et les recouvrir avec de la paille ou des végétaux humides afin de limiter la contamination du sol par les lixiviats et de limiter l'aérosolisation de certains agents pouvant être transmis par voie aérienne. En outre, l'utilisation de paille ou de végétaux humidifiés permettrait de ralentir le processus de décomposition et par voie de conséquence, de réduire les quantités de lixiviats produites. Recouvrir le cadavre d'une bâche ou d'une cloche peut s'avérer délétère si les températures extérieures sont élevées (les cadavres atteignant plus rapidement un état de décomposition avancée). De manière générale, les systèmes utilisés pour limiter l'accès aux autres espèces animales devraient être choisis de façon à ne pas accélérer le processus de décomposition ;
- les cadavres de petite taille peuvent être stockés dans des bacs ou des containers fermés ;
- les matériels ou surfaces ayant servi au stockage temporaire en surface des cadavres doivent faire l'objet d'un nettoyage et d'une désinfection dont le protocole doit être adapté à la situation, c'est-à-dire selon qu'une cause infectieuse a été identifiée, ou non. La chaux pourrait être considérée (au même titre que d'autres substances à activité biocide) pour cet usage. De plus, des mesures de biosécurité doivent être appliquées pour éviter la diffusion d'un agent pathogène tant vers l'être humain que vers les animaux ;
- sensibiliser les éleveurs aux risques liés à cette pratique qui n'est pas recommandée au-delà de 48 heures.

Des systèmes permettant de stocker temporairement les cadavres sous couvert du froid (chambres froides positives ou négatives, congélateurs) sont à privilégier. Un certain nombre d'élevages (volailles, aquacoles, porcins) sont d'ores et déjà équipés mais cette pratique est à encourager de façon à ce que plus d'élevages le soient, et que les capacités de stockage soient augmentées et améliorées. Ces dispositifs sont toutefois de capacité limitée (quelques pourcents des capacités d'élevage du site) et ne peuvent à eux seuls résoudre la gestion des grandes quantités de cadavres en élevage. Pour autant, ces équipements peuvent permettre de limiter la saturation des capacités de collecte et de traitement des cadavres, puisque l'enlèvement des cadavres pourrait être différé (de l'ordre de quelques jours à quelques semaines selon les dispositifs et selon la situation).

3.4.3. Enfouissement définitif sur sites dédiés ou en « CSDU »

L'enfouissement définitif dans des sites dédiés (sur l'exploitation ou en terrain communal) ou en « CSDU » (après autorisation des services de l'Etat en charge de l'environnement) peut être envisagé en cas de saturation des usines d'équarrissage, et éventuellement de saturation des moyens de transport (enfouissement sur le site de l'exploitation), que la mortalité résulte

d'un processus infectieux ou non. Il est à noter que les risques sanitaires et environnementaux semblent plus maitrisables en cas d'enfouissement en « CSDU » qu'en cas d'enfouissement sur l'exploitation ou sur un site dédié du fait des procédures d'analyse et de traitement des lixiviats mises en place dans ces structures.

Pour autant, si les mortalités résultaient d'un processus infectieux identifié, il conviendra de prendre en compte les risques de transmission de l'agent pathogène incriminé si les cadavres font l'objet d'un transport (vers « CSDU » ou terrain communal). Les véhicules doivent être étanches, et le protocole de nettoyage et désinfection de même que les règles de biosécurité doivent être adaptés, et rigoureusement respectés par les opérateurs. Cet élément est à prendre en compte non seulement en cas de transport en dehors du site d'élevage, mais aussi pour les matériels et véhicules ayant servi à transporter et enfouir les animaux sur le site d'élevage, ainsi que pour les manipulateurs.

Suite à l'enfouissement, les cadavres entrent dans un processus de décomposition qui génère des lixiviats ainsi que des gaz susceptibles de faire remonter les cadavres à la surface. Percer les cadavres avant enfouissement permet à ces fluides et gaz de s'échapper plus aisément et d'éviter ce phénomène. Cependant, le perçage des cadavres doit être évalué en fonction du risque sanitaire lié à cette action : risque de diffusion des éventuels pathogènes, risques liés à la biosécurité, risques pour les travailleurs, etc.

En ce qui concerne l'enfouissement hors « CSDU », la plus grande difficulté consiste à identifier un site qui soit adapté pour permettre au processus de décomposition de se mettre en place et donc, à terme, d'éliminer les cadavres, tout en limitant les risques de contamination de l'environnement, et notamment des eaux (de surface ou souterraines) par les lixiviats. Des réflexions peuvent être engagées à l'échelle d'un territoire (département par exemple) pour identifier les sites susceptibles d'être envisagés pour enfouir des cadavres d'animaux. Il est ensuite nécessaire de faire intervenir un hydrogéologue afin qu'il détermine si le site d'enfouissement envisagé est adéquat et qu'il définisse précisément celui-ci sur la base de différents critères (nature des sols, perméabilité, distances par rapport aux cours d'eau, à la nappe phréatique, pente).

Si le site est correctement choisi, les risques concernant la diffusion d'agents pathogènes à partir des cadavres en décomposition apparaissent négligeables. Certains agents présentant des capacités de résistance élevées (spores, protéines prions) peuvent néanmoins persister au niveau du site d'enfouissement pendant de longues périodes. Il existe alors un risque de résurgence au niveau local (exemple des spores de *Bacillus anthracis* et des « champs maudits » ou de botulisme avec persistance des spores de *Clostridium botulinum* dans l'environnement) mais aussi un risque de diffusion à plus ou moins grande distance dû aux ruissellements (variables selon les conditions climatiques, la topographie) ou à d'autres véhicules de dispersion (rôle potentiel d'espèces animales). L'enfouissement est à éviter dans ces situations de mortalité due à des agents pathogènes résistants.

En cas d'enfouissement sur des sites dédiés, disposer d'une étude globale à l'échelle du territoire (erg département) et de la pré-identification de sites précis permettrait de gagner du temps pour la gestion de la crise, et de réduire les risques liés à l'enfouissement de cadavres. Un suivi des sites sera à prévoir afin de connaître l'impact de l'enfouissement et de vérifier l'absence de contamination (modifications physico-chimiques, microorganismes indicateurs de contamination, et éventuellement agents infectieux précis si nécessaire).

Le recouvrement en surface constitue une modalité particulière d'enfouissement faisant l'objet d'investigations depuis peu de temps. Le manque de recul et d'informations sur la quantité de cadavres pouvant être pris en charge, les effets potentiels sur les agents pathogènes, les risques sanitaires et environnementaux potentiels, ne permettent pas aux experts de recommander le recours à cette modalité de gestion. Elle semble néanmoins pouvoir s'avérer utile, au moins pour un nombre limité de cadavres, et des études complémentaires permettraient de préciser si elle peut être envisagée, soit comme modalité de gestion définitive (en élevage ou bien pour les cadavres d'animaux de la faune sauvage), soit comme une étape de pré-traitement (avant de prendre en charge les cadavres d'une autre manière).

Enfin, les expériences passées lors d'épizooties en Europe indiquent que l'utilisation de plusieurs méthodes de gestion combinées peut être nécessaire afin d'éliminer un grand nombre de cadavres en temps de crise.

3.4.4. Ajout de chaux pour le stockage ou l'enfouissement des cadavres

Les recommandations existantes dans la littérature et dans les rapports émanant des autorités sanitaires, quant à l'utilisation de chaux et aux conditions d'usage, sont variables et parfois contradictoires. En réalité, les situations dans lesquelles le recours à la chaux serait nécessaire, ainsi que les conditions d'utilisation précises, ne sont actuellement pas clairement identifiées. Des études et des recherches visant à identifier ces situations, à préciser les conditions d'utilisation de la chaux, et à évaluer son impact environnemental sont nécessaires pour apporter des éléments de réponse concrets par rapport à ce point.

Les experts ne recommandent pas l'application de chaux de façon systématique sur des cadavres, quelle que soit la méthode de gestion de ceux-ci (stockage en surface comme enfouissement) et quelle que soit la cause des mortalités. De plus, les experts rappellent que l'application de chaux sur les cadavres peut bloquer le processus des usines d'équarrissage.

3.5. Recommandations

Suite aux réponses aux questions de la saisine, les experts souhaitent formuler plusieurs recommandations (sans hiérarchisation).

3.5.1. Recommandations d'études et de recherches

Très peu de données sont disponibles, notamment sur les enfouissements à grande échelle, il apparaît donc nécessaire d'entreprendre des recherches ciblées sur la dégradation et la gestion des cadavres d'animaux en grande quantité (plusieurs tonnes de nécromasse). Les experts préconisent la mise en place de coopérations fortes entre les différents acteurs (éleveurs, usine d'équarrissage, « CSDU », organismes d'État, laboratoires académiques, etc.) au sein de grands projets de recherche afin de faciliter ces études. Dans ce cadre, il serait extrêmement bénéfique de profiter des crises sanitaires existantes pour mener un suivi détaillé et des expérimentations. Les résultats de ces études doivent être rendus publics et accessibles, cette transparence étant la meilleure garantie de validité scientifique et d'acceptation publique. Enfin, une coopération internationale serait souhaitable, cette problématique étant largement partagée et transposable entre pays.

Plus précisément, afin de lever les incertitudes relatives à l'utilisation de la chaux sur les cadavres enfouis, et de confirmer certaines hypothèses émises dans ce rapport, les besoins de recherche portent sur :

- la mise en place de protocoles expérimentaux et d'études visant à démontrer l'efficacité de la chaux sur les microorganismes (y compris des agents pathogènes) présents dans les cadavres et à préciser les modalités précises d'utilisation dans ces situations (dose à utiliser, type de chaux, ajout d'eau ou non, etc.) pour assainir des cadavres d'animaux lors de l'enfouissement ;
- l'étude de l'impact de la chaux sur la décomposition des cadavres ;
- l'évaluation de l'impact de pré-traitements sur les cadavres, comme le broyage par exemple, avant l'application de chaux ;
- l'évaluation de l'impact environnemental potentiel en cas d'utilisation de la chaux à ces fins ;
- l'évaluation de l'efficacité et de l'intérêt de la création d'une zone sécurisée autour de la fosse d'enfouissement en considérant la chaux comme une barrière à la diffusion d'agents pathogènes.

Concernant les modalités de gestion elles-mêmes, les experts recommandent :

- d'étudier des modalités de stockage temporaire sur site, ou de pré-traitement des cadavres. Certaines méthodes sont en cours de développement (fermentation, conservation acide, bioréduction, etc.) mais ne sont pas encore disponibles à grande échelle. Elles constituent cependant des pistes à investiguer pour augmenter le panel de méthodes disponibles pour stocker les cadavres de façon sûre, en attendant leur élimination définitive et éventuellement d'en réduire le volume à traiter. De même, l'incinération par rideau d'air semble être une modalité de gestion des cadavres intéressante, mais cette méthode nécessite du matériel spécifique dont la disponibilité en France n'est pas connue.

Concernant la cinétique de dégradation des cadavres, les experts recommandent :

- d'améliorer les outils de suivi et d'enregistrement des sites d'enfouissement et de capitaliser les données déjà existantes (expérimentation, retours d'expériences, échanges). A ces fins, il conviendrait d'établir au préalable les protocoles d'enregistrement et de suivi, en associant à la fois des structures de recherche publique et des organisations professionnelles. Ces suivis pourraient être complétés par des expérimentations de terrain visant à répondre à certaines questions précises ;
- d'effectuer des recherches en modélisation afin de développer des outils d'aide à la décision (modèle prévisionnel qui orienterait vers différents types de gestion en fonction de certains paramètres d'entrée comme l'espèce, la quantité de cadavres, la cause de la mortalité, etc.) ;
- de réaliser des recherches sur l'impact des intrants (antibiotiques, antiparasitaires, etc.) sur la décomposition des cadavres, sur l'environnement, et sur les risques éventuels d'antibiorésistance (ou de résistance aux antiparasitaires). La présence de ces substances pourrait constituer un critère décisionnel pour le choix de la méthode de

gestion de certains cadavres : des animaux ayant fait l'objet d'un traitement récent pourraient être prioritaires pour une prise en charge par l'équarrissage par exemple ;

- de mettre au point des méthodes non invasives permettant le suivi de l'évolution des cadavres au niveau des différents sites de gestion (e.g. analyse des composés organiques volatils comme marqueurs de suivi).

3.5.2.Recommandations concernant la réglementation actuelle

Les experts préconisent d'étudier la possibilité de recourir au compostage pour les cadavres de volailles ou encore de poissons (et éventuellement de porcs) et d'apporter par des études supplémentaires des éléments objectivés qui permettraient de reconsidérer l'interdiction européenne.

Par ailleurs, ils soulignent que prochainement l'utilisation de la chaux sera autorisée par AMM (autorisation de mise sur le marché) pour des usages précis (désinfection des surfaces et des parcours). L'utilisation sur les cadavres n'ayant pas été incluse dans le cadre de la demande d'AMM, il ne sera alors plus possible de recourir à la chaux pour cet usage. Les experts recommandent d'envisager les modalités d'une extension de cette demande d'AMM.

3.5.3.Recommandations sur la mise en œuvre des opérations de gestion de cadavres et de gestion des situations de crise

Les experts insistent sur l'importance d'anticiper et de tester les modalités de gestion avant la crise afin d'être opérationnel lorsque celle-ci survient. Ainsi, ils préconisent, en amont de la crise :

- de disposer d'une estimation (approximative) des quantités maximales de cadavres qui pourraient nécessiter une prise en charge en cas d'événement exceptionnel à l'échelle d'un territoire (e.g. département) ;
- de disposer d'une estimation des quantités de cadavres pouvant être pris en charge par les organismes chargés de la collecte (capacités de transport) et du traitement (usines d'équarrissage) et ainsi d'identifier les besoins éventuels, ainsi que les territoires dans lesquels des problèmes pourraient se poser ;
- d'identifier les différents interlocuteurs et d'établir des procédures en concertation avec les différents acteurs impliqués dans la gestion des cadavres ; d'avoir déterminé des seuils d'alerte afin d'enclencher des actions avant d'atteindre une situation de blocage (prise en compte de signaux via les réseaux de suivi de mortalité par exemple les données de l'Observatoire des Mortalités des Animaux de Rente (OMAR), détermination d'un seuil d'alerte prédéfini par les entreprises de collecte et d'équarrissage). Les plans de délestage entre les usines d'équarrissage et les « CSDU » devraient être clairement établis (en impliquant d'avantage les « CSDU » dans l'élaboration de ceux-ci) ;
- d'établir une liste de critères permettant de prioriser les collectes¹² ;
- d'inciter davantage les élevages à s'équiper de systèmes permettant de stocker temporairement les cadavres sous couvert du froid ;

¹² Cela fait l'objet d'une question complémentaire de la DGAL qui sera traitée dans un deuxième temps.

- comme déjà évoqué auparavant, d'établir un protocole de suivi des sites d'enfouissement hors « CSDU » (paramètres suivis, durée du suivi, méthodes et matériels nécessaires, etc.) ce qui inclut d'en assurer l'enregistrement et la traçabilité ;
- de disposer dans chaque département d'un inventaire des sites avec possibilité d'enfouissement, ainsi que de la liste des hydrogéologues agréés pouvant être sollicités ;
- de mettre à jour les PNISU ainsi que les rapports d'étude de sites d'enfouissement réalisés par des hydrogéologues ;
- de constituer une cellule nationale (groupe constitué de référents spécifiquement formés à la gestion des cadavres dans ces situations d'urgence) mobilisable en temps de crise pour appuyer et aider les équipes en charge de la gestion de crise à l'échelle locale, dont la constitution doit également être anticipée. Ces groupes nationaux et locaux devraient être constitués le plus rapidement possible et participer aux différents éléments de la phase d'anticipation ;
- d'augmenter les échanges avec les autres pays ayant été confrontés à des crises sanitaires (Peste porcine africaine (PPA), influenza aviaire, gestion des cadavres de visons dans le contexte COVID-19, etc.), prendre en compte et organiser les retours d'expérience (méthode de gestion, quantité de cadavres, utilisation de la chaux, etc.) avec ces pays.

Si, dans un premier temps, il était envisagé de mettre en place ces recommandations dans un nombre restreint de départements pilotes, la priorité pourrait être donnée aux départements :

- qui ont fait face récemment à des épizooties récurrentes (e.g. influenza aviaire) ou à des risques d'introduction (e.g. PPA) et qui pourraient donc disposer d'éléments et de retours d'expérience récents ;
- ayant connu des épisodes caniculaires importants avec une quasi saturation des usines de traitement des cadavres ;
- avec des bassins de production importants dans lesquels les procédures fonctionnent bien. Inclure des départements présentant des typologies différentes : bassins avec plusieurs filières de production vs. bassins avec une filière prédominante, des types d'élevage particuliers (pisciculture, aviculture, etc.), permettrait d'identifier plus rapidement les procédures qui fonctionnent et les écueils éventuels.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail a été saisie par le Ministère chargé de l'agriculture et de l'alimentation pour un travail d'expertise sur les risques associés à l'enfouissement de cadavres d'animaux suite à des épisodes de mortalité – ou de dépeuplement - massifs avec ou sans cause infectieuse identifiée.

En l'absence de flux importants d'animaux à traiter, des filières de traitement (collecte, équarrissage) sont établies et conduisent majoritairement à une valorisation sous différentes formes, qu'elle soit thermique directe (par combustion) ou indirecte (intégrer des biocarburants) ou non (par ex. fertilisation), dont le choix dépend des risques associés et des procédés de traitement. Cependant, même après mise en œuvre des dispositifs de délestage ou de réorientation, la capacité de ces filières est susceptible d'être dépassée par un

événement ou une crise sanitaire qu'elle soit ou non d'origine anthropique. Ceci appelle à examiner d'autres voies de prise en charge et l'ensemble de ces voies ont été analysées.

L'Anses endosse les conclusions et recommandations du CES SABA relatives à l'évaluation du risque relatif à l'enfouissement de cadavres issus d'animaux d'élevage et/ou de la faune sauvage.

L'Anses insiste sur l'importance d'anticiper les modalités de gestion d'enfouissement des cadavres avant crise afin d'être opérationnel lorsque celle-ci survient, à commencer par une caractérisation précise des capacités de traitement existantes, et par celle des surfaces susceptibles de générer une capacité d'enfouissement. Il convient également de mettre à jour les PNISU et d'augmenter les échanges avec les autres pays ayant été confrontés à des crises sanitaires et de prendre en compte les retours d'expérience.

De plus, l'Anses rappelle que peu de données sont disponibles, notamment sur les enfouissements à grande échelle ainsi que sur l'utilisation de la chaux, et il apparaît donc nécessaire d'entreprendre des études ciblées sur la dégradation et la gestion des cadavres en grande quantité, dans l'optique de mieux cerner et quantifier les paramètres qui sont déterminants pour la gestion de ceux-ci. Pour ce qui concerne la chaux, l'agence considère que son utilisation est peu compatible avec un exutoire en centre de stockage de déchets ultimes dans l'hypothèse où un temps d'attente suffisant ne peut être observé avant mise en stockage, situation qui prévaudrait avec une mortalité par pathogène.

Toujours pour la chaux, l'Anses constate avec les experts que son utilisation sera autorisée par AMM pour des usages précis (désinfection des surfaces et des parcours), le dossier déposé ne prévoyant pas l'usage éventuel comme substance de traitement de cadavres. L'agence recommande d'envisager les modalités d'une extension de cette demande d'AMM.

Par ailleurs, l'Anses souligne que l'expertise collective a mis en évidence une autre alternative intéressante à l'enfouissement qui est la possibilité de recourir au compostage pour les cadavres de volailles ou encore de poissons (et éventuellement de porcs). Il apparaît pertinent d'apporter des éléments objectifs qui permettraient de reconsidérer l'interdiction européenne à ce sujet.

Enfin, l'agence mentionne que d'autres facteurs comme une pollution chimique massive, bien que non rencontrés récemment en France, peuvent être à l'origine de mortalité massive d'animaux et qui pourraient appeler une attention spécifique pour le traitement des cadavres qui en résulteraient, au même titre que la gestion d'un grand foyer épizootique.

Dr Roger Genet

MOTS-CLÉS

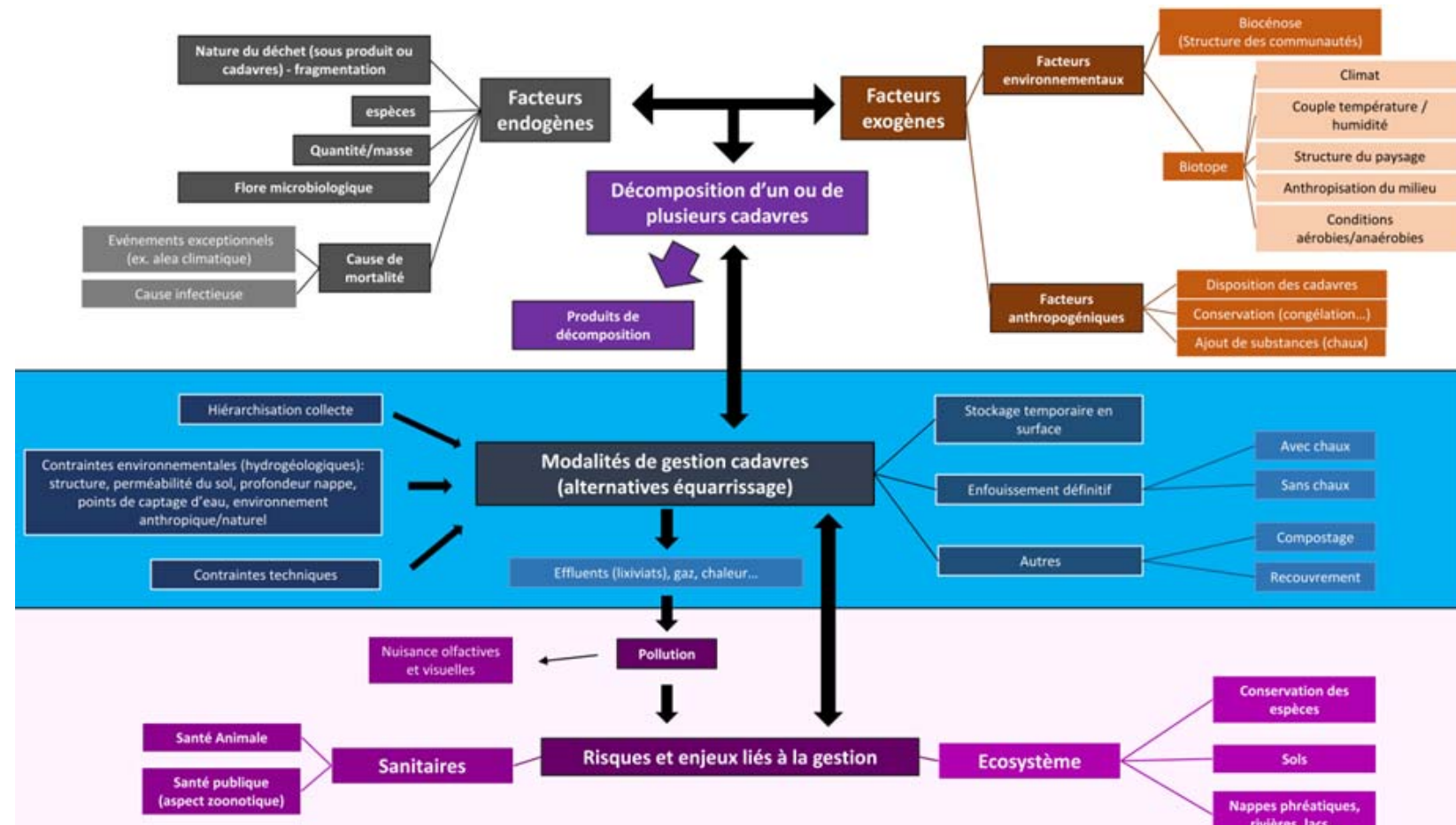
élimination de cadavres, enfouissement de cadavres, épizootie, canicule, chaux (oxyde de calcium).

carcass disposal, carcass burial, livestock diseases, heat wave, lime (calcium oxide).

CITATION SUGGÉRÉE

Anses. (2021). Evaluation du risque relatif à l'enfouissement de cadavres issus d'animaux d'élevage et/ou de la faune sauvage (saisine 2020-SA-0011). Maisons-Alfort : Anses, 26 p.

ANNEXE 1 SCHEMA EVÈNEMENTIEL



**Demande d'avis sur l'évaluation du risque relatif à
l'enfouissement de cadavres issus d'animaux
d'élevage et/ou de la faune sauvage**

Saisine « 2020-SA-0011 Enfouissement des cadavres d'animaux »

**RAPPORT
d'expertise collective**

« CES Santé et Bien-être des Animaux »

« GT Enfouissement des cadavres d'animaux »

Juin 2021

Citation suggérée

Anses. (2021). Rapport relatif à l'évaluation du risque relatif à l'enfouissement des cadavres issus d'animaux d'élevage et/ou de la faune sauvage (saisine 2020-SA-0011). Maisons-Alfort : Anses, 134 p.

Mots clés

élimination de cadavres, enfouissement de cadavres, épizootie, canicule, chaux (oxyde de calcium).

carcass disposal, carcass burial, livestock diseases, heat wave, lime (calcium oxide).

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, intuitu personae, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL (GT ENFOUISSEMENT DES CADAVRES D'ANIMAUX)

Présidente

Mme Carole PEROZ-SAPEDE – Maître de conférences, Oniris Nantes + infectiologie, maladies règlementées, approche intégrée

Vice-Présidente

Mme Sylvie MIALET – Responsable des formations statutaires et diplômantes, VETAGROSUP + approche intégrée, cadre réglementaire et normatif, évaluation de risques

Membres

M. Henri-Jean BOULOUIS – Professeur, ENVA + bactériologie, diagnostic de laboratoire, immunologie, vaccinologie

M. Damien CHARABIDZE – Maître de conférence HDR, Université de Lille + biologiste, insectes nécrophages

M. Boris CHEVRIER – Hydrogéologue, Bureau des Recherches Géologiques et Minières + Ingénieur géotechnique, stockage et confinement des déchets, géotechnique, environnement, démission en date du 13 octobre 2020

Mme. Anouk DECORS – vétérinaire épidémiologiste, Office Français de la Biodiversité + médecine vétérinaire, épidémiologie, diagnostic nécropsique, nécropsie médico-légale

M. Etienne GIRAUD – Chargé de recherche, INRAE Tours + bactériologie

M. Clément MARTIN – Assistant bio ingénieur, Université de Liège + chimie, entomologie, thanatochimie

Mme Claire PONSART – Anses Maisons-Alfort + bactériologie, infectiologie, diagnostic de laboratoire

Mme Rozenn SOUILLARD – Vétérinaire épidémiologiste, Anses Ploufragan + épidémiosurveillance, aviculture, pathologies en élevage

M. Jean-Pierre VAILLANCOURT – Professeur, Université de Montréal + épidémiologie, évaluation de risque

COMITE D'EXPERTS SPECIALISE

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

- CES SABA – 11 mai 2021, 7 et 8 juin 2021

Président

M. Gilles MEYER – Professeur, ENVT + virologie, immunologie, vaccinologie

Membres

Mme Catherine BELLOC – Maître de conférences, Oniris-Nantes + infectiologie, approche intégrée

M. Stéphane BERTAGNOLI – Professeur, ENVT + virologie, immunologie, vaccination

M. Alain BOISSY – Chercheur, INRA Clermont + bien-être animal

M. Henri-Jean BOULOUIS – Professeur, ENVA + bactériologie, diagnostic de laboratoire, immunologie, vaccinologie

M. Eric COLLIN – Vétérinaire praticien + médecine vétérinaire, médicament vétérinaire, maladies vectorielles, maladies à prion

M. Jean-Claude DESFONTIS – Professeur Oniris-Nantes + physiologie, bien-être animal, médecine vétérinaire

Mme Maria-Eleni FILIPPITZI – Epidémiologiste, CODA-CERVA + épidémiologie, évaluation de risque

M. David FRETIN – Chef de service, CODA-CERVA + bactériologie, zoonoses, diagnostic de laboratoire

Mme Emmanuelle GILOT-FROMONT – Professeur, VetAgro Sup + infectiologie, épidémiologie, évaluation de risque, faune sauvage

M. Etienne GIRAUD – Chargé de recherche, INRA Tours + bactériologie

M. Lionel GRISOT – Vétérinaire praticien + médecine vétérinaire, médicament vétérinaire

Mme Nadia HADDAD – Professeur, ENVA + infectiologie, maladies règlementées, zoonoses

Mme Viviane HENAU – Chargée de recherche, Anses Lyon + épidémiologie, évaluation de risque

Mme Elsa JOURDAIN – Chargée de recherche, INRA Clermont + épidémiologie, évaluation de risque, faune sauvage

Mme Sophie LE BOUQUIN – LE NEVEU – Epidémiologiste, Anses Ploufragan + épidémiologie, évaluation de risque, approche intégrée

Mme Sophie LE PODER – ALCON – Maître de conférences, ENVA + virologie, immunologie, vaccinologie

Mme Elodie LEROY MONCHATRE – Directrice, Anses Nancy + virologie, épidémiologie, évaluation de risques, faune sauvage

Mme Monique L'HOSTIS – Retraitée, Oniris Nantes + parasitologie

M. François MEURENS – Professeur, Oniris Nantes + virologie, immunologie, vaccinologie

M. Pierre MORMEDE – Directeur de recherche, INRA + bien-être animal

M. Hervé MORVAN – Vétérinaire biologiste, Labocéa22 + bactériologie, diagnostic de laboratoire. Démission en mai 2021.

Mme Carine PARAUD – Anses Niort + parasitologie

Mme Ariane PAYNE – Chargée d'étude, ONCFS + épidémiologie, évaluation de risque, faune sauvage

Mme Carole PEROZ-SAPEDE – Maître de conférences, Oniris Nantes + infectiologie, maladies règlementées, approche intégrée

Mme Claire PONSART – Anses Maisons-Alfort + bactériologie, infectiologie, diagnostic de laboratoire

M. Claude SAEGERMAN – Professeur, Université de Liège + épidémiologie, évaluation de risque

Mme Gaelle SIMON – Chercheur, Anses Ploufragan + virologie, immunologie

M. Jean-Pierre VAILLANCOURT – Professeur, Université de Montréal + épidémiologie, évaluation de risque

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme Justine CORRE - Coordinatrice scientifique d'expertise - Anses-DER-UIERSABA

Mme Florence ÉTORÉ - Adjointe à la cheffe d'unité - Anses-DER-UIERSABA

Contribution scientifique

Mme Isabelle ATTIG – Cheffe d'unité, Unité d'évaluation de l'efficacité des biocides, Direction de l'évaluation des produits réglementés - Anses

M. Ali JAFFAL – Coordinateur scientifique d'expertise – Anses DER-UIERSABA

Secrétariat administratif

M. Régis MOLINET – Anses

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Direction Générale de l'Alimentation (DGAL)

Mme Anne LÉBOUCHER – Référente nationale sur la thématique des sous-produits animaux, Bureau de la prévention des risques sanitaires en élevage, DGAL

Mme Christelle MATHONIERE – Chargée d'étude sous-produits animaux, Bureau de la prévention des risques sanitaires en élevage, DGAL

Professionnels de l'équarrissage

Mr Frédéric BELLANGER – Responsable du groupe équarrissage du Syndicat des industries françaises des coproduits (SIFCO), ATEMAX

Mme Oriane BOULLEVEAU – Secrétaire générale du SIFCO

Mr Hervé FUMERY – Président du SIFCO, SARIA

Société SEDA

Mr Eric ANCEL – Directeur du Centre de stockage de déchets ultimes (CSDU) de Champteusse sur Baconne, SEDA

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations.....	10
Liste des tableaux	11
Liste des figures.....	12
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise	13
1.1 Contexte de la saisine.....	13
1.2 Objet de la saisine	13
1.3 Modalités de réalisation de l'expertise	15
1.3.1 Organisation de l'expertise	15
1.3.2 Moyens mis en œuvre.....	16
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts	17
2 Introduction.....	18
3 Décomposition des cadavres et évolution microbiologique <i>post mortem</i>.....	29
3.1 Description des étapes de décomposition.....	29
3.2 Les voies de décomposition.....	31
3.3 Evolution microbiologique au cours de la décomposition	32
3.4 Produits de dégradation des cadavres.....	36
3.4.1 Décomposition des protéines	37
3.4.2 Décomposition des graisses.....	38
3.4.3 Décomposition des hydrates de carbones.....	38
3.4.4 Décomposition des os	39
3.5 Facteurs influençant la décomposition des cadavres	40
3.5.1 Les facteurs exogènes	40
3.5.2 Facteurs endogènes.....	41
3.6 Evolution de l'environnement et devenir des agents infectieux à enjeux sanitaires	42
3.6.1 Evolution de l'environnement	42
3.6.2 Devenir des agents infectieux à enjeux sanitaires	46
3.7 Synthèse sur la décomposition des cadavres	50
4 Description et analyse des modalités de gestion des cadavres en cas de circonstances exceptionnelles, contraintes et risques associés	52
4.1 Stockage temporaire sur le site de l'élevage avec élimination vers les centres d'équarrissage.....	53
4.1.1 Stockage en surface.....	53
4.1.2 Par fermentation.....	54

4.1.3	Par préservation acide	54
4.1.4	Par réfrigération ou congélation.....	55
4.2	Enfouissement définitif en profondeur des cadavres sur site.....	55
4.2.1	Définition	55
4.2.2	Modalités et contraintes	57
4.2.3	Risques sanitaires et environnementaux	61
4.3	Utilisation de la chaux.....	65
4.3.1	Réglementation concernant l'utilisation de la chaux lors d'enfouissement de cadavres 66	
4.3.2	Mode d'action de la chaux.....	66
4.3.3	Résultats de la recherche bibliographique.....	67
4.4	Le compostage des cadavres sur le site de l'exploitation	74
4.4.1	Définition	74
4.4.2	Modalités et contraintes	75
4.4.3	Risques sanitaires et environnementaux (avantages/inconvénients).....	77
4.5	Le recouvrement en surface des cadavres sur site	82
4.5.1	Définition	82
4.5.2	Modalités et contraintes	83
4.5.3	Risques sanitaires et environnementaux (avantages/inconvénients).....	83
4.6	Autres modalités de gestion des cadavres sur le site.....	85
4.6.1	Incinération	85
4.6.2	Autres modalités	89
4.7	Principes généraux d'organisation sur le site	90
4.7.1	L'anticipation, une étape indispensable	90
4.7.2	Les risques pour les opérateurs et les mesures de biosécurité à mettre en œuvre.91	
4.7.3	Points d'attention après la mise en place des opérations de gestion des cadavres 92	
4.7.4	Synthèse sur les modalités de gestion des cadavres	94
5	Incertitudes	97
6	Conclusions, réponses aux questions de la saisine et recommandations	98
6.1	Conclusions et réponses aux questions de la saisine	98
6.2	Recommandations.....	103
7	Bibliographie.....	107
7.1	Publications	107
7.2	Normes.....	119
7.3	Législation et réglementation	119
	Annexe 1 : Lettre de saisine	122

Annexe 2 : Profil de recherche bibliographique « Chaux »	124
Annexe 3 : Grille de lecture recherche bibliographique « chaux » (extrait)	130
Annexe 4 : Recherches bibliographiques « enfouissement »	131
Annexe 5 : Grille de lecture recherche bibliographique « Enfouissement » (extrait) .	132

Sigles et abréviations

APDI : arrêté préfectoral portant déclaration d'infection

ARN : acide ribo nucléique

ARS : agence Régionale de Santé

ATM : animaux trouvés morts

ATP : adénosine triphosphate

BRGM : bureau des recherches géologiques et minières

C1 : catégorie 1

C2 : catégorie 2

CES : comité d'experts spécialisé

CRPM : Code Rural et de la Pêche Maritime

CSDU : centre de stockage de déchets ultimes

DDTSPP : Direction départementale de l'emploi, du travail, des solidarités et de la protection des populations

DGAL : direction générale de l'alimentation

FAM : France AgriMer

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FVO : farine de viandes et d'os

GT : groupe de travail

ICPE : installations classées pour la protection de l'environnement

IDC : ilots de décomposition cadavérique

MRS : Matériels à Risque Spécifié

OFB : Office français de la biodiversité

OIE : Organisation mondiale de la santé animale

OMS : Organisation mondiale de la santé

PNISU : Plan National d'Intervention Sanitaire d'Urgence

PPA : peste porcine africaine

PPC : peste porcine classique

SCFA : acides gras à chaîne courte

SIFCO : syndicat des industries françaises des coproduits animaux

SIDPC : service interministériel de défense et de protection civile

t : tonne

TIAC : toxi infection alimentaire collective

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des produits de dégradations (en fonction des matières premières)	39
Tableau 2 : Résumé des modifications biologiques et chimiques des sols associés aux cadavres au cours de la décomposition (O Carter 2017)	45
Tableau 3 : Résumé des principaux avantages et inconvénients de l'enfouissement selon différents organismes	63
Tableau 4 : Avantages et inconvénients de l'utilisation de la chaux	73
Tableau 5 : Résumé des principaux avantages et inconvénients du compostage	80
Tableau 6: Résumé des principaux avantages et inconvénients du recouvrement en surface.	84
Tableau 7 : Résumé des principaux avantages et inconvénients de l'incinération (en plein-air).	87
Tableau 8: Synthèse sur les différentes méthodes de stockage temporaire ou de gestion envisagées	95

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des usines d'équarrissage (source DGAL)	20
Figure 2 : Schéma de l'organisation générale de l'élimination des cadavres.	23
Figure 3 : Schéma du fonctionnement d'un « CSDU » de classe 2 (Source http://www.sydevom04.fr/les_exutoires/le-centre-d-enfouissement/)	25
Figure 4 : Schéma évènementiel	27
Figure 5 : Résumé des différents stades de décomposition de cadavres de suidés (a : cadavre frais, b : début de putréfaction, c : putréfaction avancée, d : dessiccation avancée, e : squelettisation) (Dickson <i>et al.</i> 2011).....	31
Figure 6 : Représentation des différentes étapes de la décomposition d'un cadavre (Source D. Charabidze).....	32
Figure 7 : Agents microbiens de la décomposition d'un cadavre humain (d'après Metcalf 2016)	34
Figure 8 : Ilot de décomposition cadavérique (d'après (Carter, Yellowlees et Tibbett 2007))	43
Figure 9: Interactions au sein du nécrobiome avec la nécromasse, l'écosystème et l'habitat (M. Eric Benbow <i>et al.</i> 2019)	50
Figure 10 : Enfouissement définitif en profondeur (source FAO, 2018).....	57
Figure 11 : Stades de compostage et évolution de la température (d'après (K.G. Wilkinson <i>et al.</i> 2003)).....	75
Figure 12 : Compostage à grande échelle en Amérique du Nord (crédit photo BC Ministry of Agriculture, 2006).....	78
Figure 13 : Recouvrement en surface (L. Miller et Flory 2018)	83
Figure 14 : Principe de l'incinérateur à rideau d'air (source : airburners.com lien consulté le 13 avril 2021)	86

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte de la saisine

L'évaluation demandée porte sur le risque de propagation de microorganismes potentiellement pathogènes par les cadavres et les sous-produits d'animaux d'élevage ou de la faune sauvage, lors de leur stockage ou de leur enfouissement (en utilisant ou non de la chaux). Cette demande s'inscrit dans le cadre de la découverte de cadavres qui ne peuvent pas être collectés et/ou acheminés dans la filière de transformation des sous-produits animaux, ou dans celui de surmortalité importante :

- **dans un contexte sans cause infectieuse identifiée** (e.g. canicule, inondation). En effet, pendant les derniers épisodes de canicule en 2019-2020, les capacités des usines d'équarrissage ont été dépassées et ces dernières se sont trouvées dans l'incapacité de fonctionner normalement. Si un dépeuplement par abattage est planifié, les usines d'équarrissage ont la capacité de s'organiser et de prendre en charge la transformation de tous les cadavres. Le contexte est différent en cas de canicule où beaucoup d'animaux meurent brutalement dans un laps de temps très court, sans planification possible. De plus, en cas de forte chaleur, les cadavres d'animaux laissés à température ambiante se dégradent très rapidement. C'est notamment le cas des cadavres de volailles, les cadavres se liquéfiant et devenant difficiles à manipuler et à transporter. Par ailleurs, les cadavres trop dégradés ne peuvent pas être éliminés au niveau d'une usine d'équarrissage, les matières trop liquides ayant tendance à bloquer le processus;
- **dans un contexte sanitaire défavorable**. Certains agents pathogènes¹ peuvent entraîner des mortalités importantes au sein d'un élevage ou même d'une filière de production. En plus des mortalités directes induites par l'agent pathogène, des mesures de dépeuplement peuvent également être instaurées afin de maîtriser la diffusion de l'infection (e.g. influenza aviaire ou fièvre aphteuse). Dans une telle situation, les capacités de traitement des usines d'équarrissage peuvent aussi être dépassées et nécessiter la mise en place de mesures alternatives de gestion des cadavres. Par rapport à la situation précédente (sans cause infectieuse particulière), le risque de diffusion de l'agent pathogène est à prendre en compte.

1.2 Objet de la saisine

L'Anses a été saisie, en date du 17 janvier 2020, par la Direction générale de l'alimentation (DGAL), d'une demande d'avis sur l'évaluation du risque relatif à l'enfouissement de cadavres et déchets de venaison issus d'animaux d'élevage et/ou de la faune sauvage (saisine 2020-SA-0011, cf. Annexe 1).

¹ Dans ce rapport, le terme agent pathogène sera utilisé pour qualifier les agents infectieux pouvant avoir un impact négatif sur la santé des êtres humains et/ou des animaux, qu'ils soient domestiques ou sauvages.

La formulation des questions a été discutée avec le demandeur le 18 décembre 2019 et le 25 mai 2020. Après ces discussions, les questions de la saisine sont les suivantes :

« **DANS UN CONTEXTE DE CANICULE OU D'INONDATION** (toute suspicion de cause infectieuse écartée) :

- **Identifier la cinétique de développement des microorganismes** (bactéries, virus, parasites, champ et levures, prions) lors de la décomposition de cadavres de suidés, volailles, ruminants domestiques, poissons d'élevages (notamment ceux présentant un risque de pathogénicité pour la faune domestique et/ou la faune sauvage)
 - effets des paramètres environnementaux (température, hygrométrie, UV, etc.)
 - variabilité de cette cinétique selon le stade de développement des animaux ou la quantité de cadavres.
- **Evaluer, les risques liés au stockage en surface des cadavres, pendant un délai variable (48 h, une semaine, deux semaines, un mois) :**
 - en élevage
 - en installation de stockage de déchets non dangereux (si elles sont autorisées pour recevoir des matières fermentescibles) ou en décharge (sans base réglementaire)
 - en usine de transformation ou centre de collecte (considérer les cadavres en état de décomposition très avancée).
- **Evaluer, en fonction des différentes modalités d'enfouissement, les risques de propagation de microorganismes pathogènes de cadavres d'animaux d'élevage :** sur le site de l'exploitation ou en installation de stockage de déchets non dangereux
 - considérer dans cette question la gestion des mortalités de poissons (de rivière ou d'élevage quand collecte impossible par exemple)
 - nécessité de la chaux, permet-elle de diminuer le risque, à quelles doses ? »

EN CONTEXTE SANITAIRE DEFAVORABLE, EVALUATION DU RISQUE DE PROPAGATION DE MICROORGANISMES PATHOGENES PAR ENFOUISSEMENT DE CADAVRES OU DECHETS DE VENAISON :

- « Evaluer le risque de diffusion d'agents de maladies chroniques et/ou enzootiques et/ou aigues et/ou à plan d'urgence, aux animaux d'élevage (porcs, volailles, ruminants, poissons) en cas d'enfouissement de cadavres d'animaux d'élevage ou sauvages et/ou déchets de venaison ».

Les dangers sanitaires ciblées sont ceux pour lesquels la mortalité est plus importante et/ou ceux à risque de diffusion important et pour lesquels le transport des cadavres doit être limité, notamment :

- l'influenza aviaire
- la fièvre aphteuse
- la fièvre charbonneuse (cadavres collectés, mais attention au cas index non identifié)
- les pestes porcines (peste porcine africaine, PPA et peste porcine classique, PPC)
- le botulisme dans la faune sauvage et la faune domestique

- « Indiquer les modalités d'enfouissement à préconiser.

-
- *Indiquer si l'utilisation de chaux permet de diminuer ce risque à un niveau faible (estimation de la dose équivalent au poids du cadavre si possible) ».*

Après discussion avec le demandeur, les mortalités massives d'animaux liées à un accident chimique n'entrent pas dans le champ de la saisine.

Concernant l'enfouissement des déchets de venaison dans un contexte défavorable, cette question n'a pas pu être traitée par le GT. En effet, cette question nécessite des recherches spécifiques, dans un contexte différent de celui d'un enfouissement massif d'animaux morts (y compris de la faune sauvage) suite à une épizootie : définition du déchet de venaison (s'agit-il essentiellement de viscères ou faut-il prendre en compte du gibier entier ?), description et évaluation des différentes modalités de gestion des déchets de venaison par enfouissement en France, auditions de parties prenantes très différentes de celles réalisées, prise en compte de différents contextes sanitaires dans lesquels la question serait posée, etc. Cette question devra faire l'objet d'une saisine séparée.

Suite à une présentation des résultats des travaux menés, la DGAL a demandé à l'Anses de prolonger le travail réalisé afin de proposer, en complément de l'avis et du rapport, « *un document d'aide à la décision des modalités de gestion des cadavres et déchets de venaison issus d'animaux d'élevage et/ou de la faune sauvage en fonction :*

- *des causes de mortalité,*
 - *des volumes concernés,*
 - *des espèces,*
 - *des conditions environnementales ambiantes (température, notamment) qui peuvent accélérer leur dégradation*
 - *de l'environnement de l'élevage ayant une forte mortalité (présence d'animaux de la même espèce ou d'autres espèce(s) au sein de l'élevage, zone dense en élevage, proximité d'autre(s) élevage (s), de riverains, de voies publiques, statut sanitaire environnant),*
 - *de la localisation géographique des cadavres,*
 - *du risque de dissémination d'un danger sanitaire via la faune sauvage en lien avec une "exposition" des cadavres,*
 - *du délai de mise en œuvre de l'enfouissement,*
 - *de tout autre élément que le groupe d'experts trouvera pertinent,*
- et en tenant compte de la localisation géographique des usines de transformation. »*

Cette attente complémentaire nécessite un complément d'expertise que l'Anses va mener. Ce complément, attendu pour décembre 2021, est de nature à conduire à la production d'un avis complété. Le dispositif d'aide à la décision qui sera proposé reposera sur les paramètres qui seront considérés par les experts comme pertinents.

1.3 Modalités de réalisation de l'expertise

1.3.1 Organisation de l'expertise

L'Anses a confié au groupe de travail (GT) « Enfouissement de cadavres d'animaux », rattaché au Comité d'Experts Spécialisé (CES) « Santé et bien-être des animaux » (SABA), l'instruction de cette saisine.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires (bactériologie, diagnostic nécropsique, entomologie, épidémiologie, évaluation de risque, expert judiciaire, infectiologie, maladies réglementées, pathologies en élevage, thanatochimie). La mise en commun des contributions et les échanges se sont tenus en réunion de GT, à raison d'une réunion par mois d'avril 2020 à mai 2021.

Les travaux d'expertise du GT ont été soumis au CES SABA tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques au cours des réunions des 8 janvier, 11 mai et 7 juin 2021. Le rapport produit par le GT tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES SABA.

Les travaux du GT « Enfouissement des cadavres d'animaux » ont été adoptés par le CES SABA le 08 juin 2021.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) ».

1.3.2 Moyens mis en œuvre

1.3.2.1 Recherche bibliographique

Une première recherche bibliographique approfondie a été réalisée en suivant une méthodologie de revue systématique de la littérature afin de recenser les connaissances scientifiques existantes sur l'utilisation de la chaux lors de l'enfouissement des cadavres d'animaux.

La première étape de cette recherche a été de déterminer des mots-clés pertinents pour la requête bibliographique en se basant sur le profil de recherche bibliographique proposé par l'Anses (ANSES/PR1/9/06-01) (Annexe 2).

Une fois les mots-clés définis par les experts, la requête a été menée sur deux bases de données, Web of Science® et Scopus®. Après élimination des doublons, 461 articles ont été recensés (diagramme PRISMA Annexe 2).

Plusieurs étapes de sélection ont permis d'en réduire le nombre tout en assurant l'exhaustivité et la pertinence des études retenues :

- dans un premier temps, les experts, en binôme, se sont répartis les 461 résumés conservés pour les trier sur la base des titres et résumés. Les critères d'inclusion étaient les suivants : description de l'utilisation de la chaux sur des matières organiques, description des effets de la chaux sur des microorganismes, description des effets de la chaux sur le processus de dégradation des cadavres, description des effets de la chaux sur l'environnement et les manipulateurs. Ce premier tri a permis de conserver 79 articles ;
- dans un deuxième temps, les articles conservés ont été étudiés de manière approfondie (lecture de l'article et analyse de sa qualité) par un binôme d'expert du GT. Pour faciliter ce tri, une grille de lecture (sous Excel®) a été créée en GT et remplie par les experts afin de recueillir et recenser les éléments de lecture jugés pertinents pour répondre aux questions de la saisine. Cette étape a permis de conserver 36 articles. Un extrait de cette grille est disponible en Annexe 3.

Trois articles ont également été identifiés à partir de la bibliographie des publications de la requête bibliographique initiale.

Afin de garantir la traçabilité de cette recherche bibliographique, le nombre d'études triées et examinées en vue de leur éligibilité et le nombre d'articles exclus sont résumés et représentés sous la forme d'un diagramme de flux de type PRISMA (Annexe 2).

Une deuxième recherche bibliographique a été menée sur l'enfouissement des cadavres d'animaux. Plusieurs requêtes ont été réalisées dans Scopus® (Annexe 4).

Après un premier tri effectué par la coordination sur la base de la lecture du titre et du résumé, ces différentes requêtes ont permis de recenser 125 articles potentiellement intéressants pour répondre aux questions de la saisine.

Dans un second temps, les articles conservés ont été répartis par binôme d'experts pour analyse approfondie (lecture de l'article et analyse de sa qualité). Pour faciliter ce tri, une grille de lecture (sous Excel®) a été créée en GT et remplie par les experts afin de recueillir et recenser les éléments de lecture jugés pertinents dans le cadre de la saisine. Un extrait de cette grille de lecture est disponible en Annexe 5. Ce deuxième tri a permis de conserver 71 références.

D'autres articles ont été identifiés à partir de la bibliographie des articles obtenus des requêtes bibliographiques initiales et les experts ont également identifié des articles dans leur corpus bibliographique personnel.

Enfin, des recherches complémentaires ont été réalisées dans des revues jugées pertinentes par rapport à la thématique de la saisine (Forensic Science International®), dans les archives d'organismes sanitaires internationaux (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture FAO, Organisation mondiale de la santé OMS, Organisation mondiale de la santé animale OIE) et dans les rapports gouvernementaux d'autres pays (Canada, Australie, Etats Unis, Grande Bretagne).

1.3.2.2 Auditions

Plusieurs auditions de professionnels ont été menées au cours de cette expertise. La liste des personnes auditionnées est présentée en début de rapport.

L'Union des Producteurs de chaux (UP 'chaux) a été sollicitée par mail en la personne de Mme Laurence Patourel, pour des questions plus ciblées.

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'agence (www.anses.fr).

2 Introduction

La gestion des cadavres, issus d'animaux trouvés morts en élevage ou mis à mort pour un motif autre que la consommation humaine (en vue de leur valorisation ou de leur élimination), répond à des impératifs de santé publique vétérinaire. Il s'agit, selon les cas, de répondre à une contrainte d'hygiène quand les animaux ne sont pas malades (ne pas laisser se dégrader sur place un cadavre pouvant générer des pollutions du sol et des odeurs), ou d'éliminer une source potentiellement importante de contamination. Ces cadavres sont considérés selon le dispositif réglementaire en vigueur, comme des sous-produits animaux de catégorie 2 (C2) ou de catégorie 1 (C1)² selon les espèces concernées et/ou les substances qu'ils sont susceptibles de contenir. Les traitements subis et la valorisation ultérieure des cadavres sont différents selon la catégorie à laquelle ils appartiennent.

Brièvement, les sous-produits animaux de catégorie 1 sont, soit des sous-produits susceptibles de contenir des substances illégales, des contaminants chimiques, des protéines prions pathogènes ; soit des cadavres d'animaux de compagnie, d'animaux détenus en parc zoologique, ou encore d'animaux sauvages. Ils ne peuvent faire l'objet que d'une valorisation énergétique comme combustible ou biocarburant par exemple.

Les sous-produits animaux de catégorie 2 (C2) peuvent être valorisés en fertilisation ou encore biocarburants. Ils ne peuvent pas être utilisés en alimentation animale. Il s'agit, pour les sous-produits animaux qui ne sont pas classés dans la partie précédente, de cadavres animaux susceptibles de contenir des résidus médicamenteux, ou de toute partie d'un cadavre trouvé mort en dehors d'un abattoir.

Dans tous les cas la méthode d'élimination à privilégier, selon l'autorité compétente, est l'équarrissage, même si ce choix dépendra notamment de l'état de décomposition du cadavre et de son accessibilité. Le cas des animaux domestiques ou d'élevage sera distingué de celui des animaux sauvages.

➤ Collecte des cadavres d'animaux morts

Au titre de l'article L 226-2 du code rural et de la pêche maritime, « constituent une activité d'équarrissage la collecte, la manipulation, l'entreposage après collecte, le traitement ou l'élimination d'un ou plusieurs cadavres ou de parties de cadavres d'animaux ou d'autres matières animales ». Ces divers sous-produits animaux sont ensuite transformés et valorisés ou éliminés.

Depuis l'entrée en vigueur de la libéralisation du service public de l'équarrissage en 2009, les filières assurent la gestion et le financement complet de l'équarrissage. Pour les animaux trouvés morts en élevage, un marché de prestations de collecte, de transformation et d'élimination des cadavres a été conclu en juillet 2009 entre les filières représentées par sept associations « animaux trouvés morts » (ATM)³ et chacun des quatre équarrisseurs présents

² Règlement (CE) N° 1069/2009 du Parlement Européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine et abrogeant le règlement (CE) N°1774/2002 (règlement relatif aux sous-produits animaux) – <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:300:0001:0033:FR:PDF> lien consulté le 30 avril 2021.

³ Le service de l'équarrissage des animaux trouvés morts (ATM) en élevage est financé et piloté par des organisations nationales issues des interprofessions, les ATM. Spécialisées par espèce, les ATM ont mis en place des accords interprofessionnels nationaux permettant de répartir aux éleveurs, aux industriels, aux distributeurs et aux consommateurs la charge financière de l'équarrissage des animaux trouvés morts en élevage. Les ATM

sur le territoire français (hors DROM). Chaque éleveur en France doit faire une demande d'enlèvement à son équarrisseur dans un délai de deux jours francs (deux jours travaillés, déduction faite des week-ends et jours fériés), pour que le ou les cadavres soient enlevés. En général, un département ou une zone de département est affecté à un équarrisseur qui est chargé d'assurer l'équarrissage sur le territoire que lui ont confié l'ATM ou l'État. Pour les animaux domestiques, la prestation d'enlèvement et de traitement relève, selon les cas, de la collecte privée des animaux trouvés morts (animaux de compagnie) ou d'un service public (animaux d'élevage ou lots d'animaux de plus de 40 kg morts en exploitation). Dans ce dernier cas, les modalités, les montants payés par les propriétaires d'animaux, les délais de prise en charge après appel et les procédés d'élimination des cadavres sont fixés par contrat entre l'Etat et les entreprises privées réparties sur le territoire national et les cadavres sont traités en usine d'équarrissage.

La collecte est effectuée régulièrement dans les communes avec des camions (poids lourds d'environ 20 t) dédiés, étanches, lavables et pouvant être désinfectés. Les matières peuvent ensuite être regroupées dans les **centres de collecte** (un centre de collecte pour deux départements en France). De ces centres de collecte, les matières repartent en flux tendu (traitement des cadavres en 24 h), sans stockage particulier vers les **usines de traitement** dont le nombre est plus limité (huit en France, voir la Figure 1). Ces huit usines traitent tous les animaux morts collectés dans les élevages français et traitent aussi, parallèlement à cela, des sous-produits animaux d'abattoirs C1/C2, ce qui correspond environ à 450 000 t d'animaux trouvés morts dans les élevages et à peu près autant de sous-produits animaux d'abattoirs C1/ C2.

établissent un cahier des charges de la prestation d'équarrissage en élevage et, sur la base de ce cahier des charges, lancent régulièrement des appels d'offres pour ce marché ATM, et retiennent un ou plusieurs prestataires d'équarrissage par département

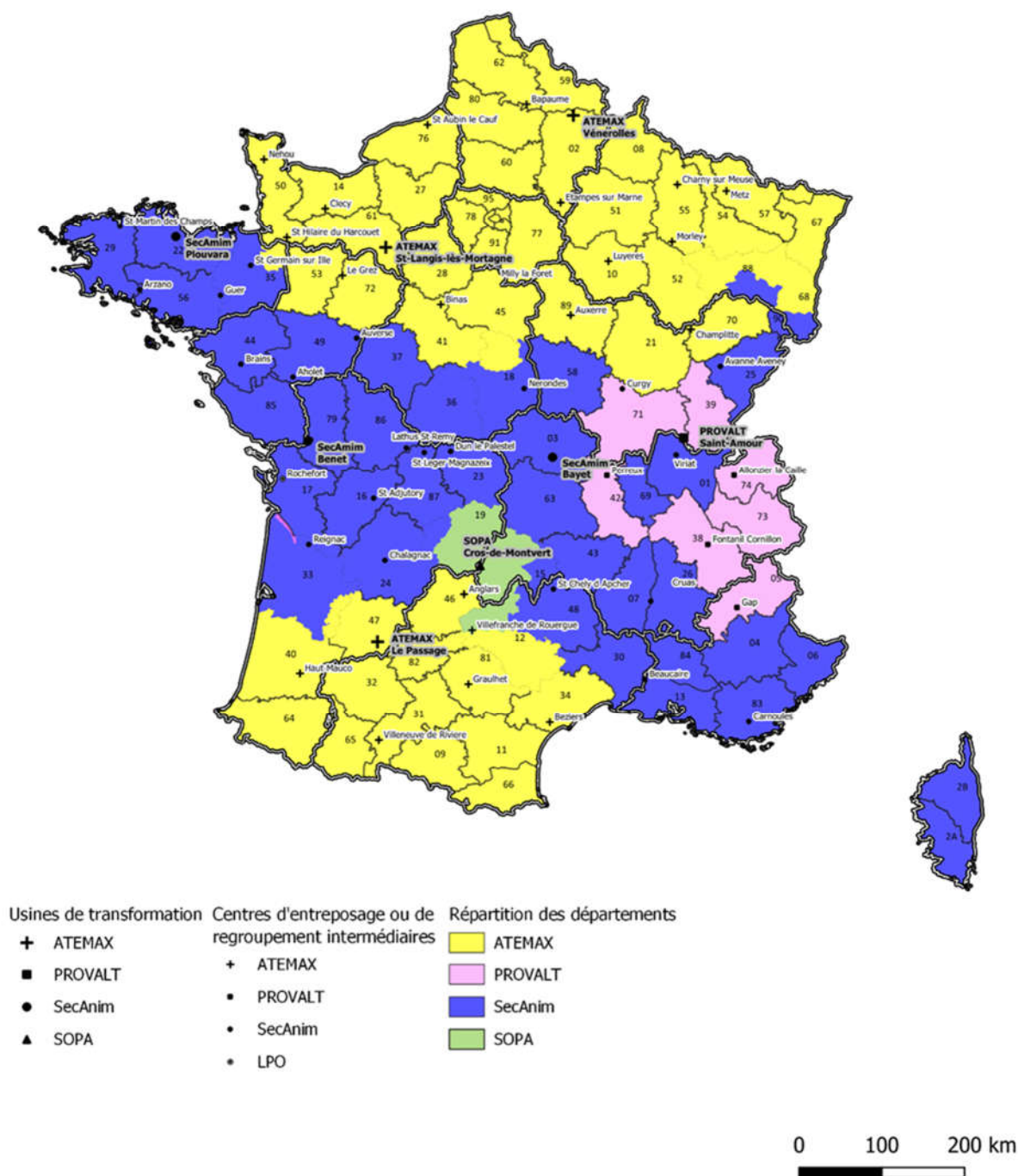


Figure 1 : Localisation des usines d'équarrissage (source DGAL)

Dans le cadre de l'application de mesures de police sanitaire visant à limiter la propagation ou à éradiquer certains agents pathogènes, des élevages peuvent faire l'objet de dépeuplement. Les cadavres d'animaux des élevages concernés sont alors collectés et transportés dans ces mêmes structures d'équarrissage sur réquisition préfectorale.

L'État a la responsabilité de la collecte et de l'élimination des cadavres d'animaux de plus de 40 kg dont le propriétaire est inconnu ou inexistant (art. L. 226-1 du CRPM). Lorsque le propriétaire d'un cadavre d'animal est inconnu (ou s'il est de statut *res nullius*, c'est-à-dire qu'il n'appartient à personne), à l'expiration d'un délai de 12 heures après la découverte de celui-

ci, le maire de la commune sur le territoire de laquelle se trouve ce cadavre en avise le titulaire du marché chargé de la collecte et l'invite à procéder à l'enlèvement du cadavre dans un délai de deux jours francs (art. L. 226-6 et R. 226-12 du CRPM). C'est pour cette raison que, parallèlement à l'appel d'offres ATM, il subsiste un service gratuit *via* un appel d'offres FranceAgrimer (FAM) pour les cadavres trouvés sur la voie publique, sans propriétaire identifié ou les cétacés échoués.

L'animal sauvage libre ayant un statut « *res nullius* », ce sont les modalités décrites précédemment qui s'appliquent. Il existe cependant une exception pour le grand gibier⁴ tué accidentellement à la suite d'une collision avec un véhicule automobile, qui peut être transporté pour consommation personnelle sous réserve que le conducteur en ait préalablement prévenu les services de la gendarmerie ou de la police nationales (art. L. 424-9 du Code de l'environnement).

En définitive, concernant la faune sauvage, la collecte s'effectue dans le cadre d'une procédure de déclaration, mise à disposition, entreposage particulièrement définie pour laquelle il est fait une distinction selon le poids des cadavres et les risques éventuels de zoonoses. Il revient soit à l'État soit au maire de procéder ou faire procéder à la collecte pour la destruction des cadavres de faune sauvage par le prestataire de la mission de service public de l'équarrissage. Le maire est tenu de faire enlever un cadavre sur le domaine public dont il a la responsabilité. La présence de cadavres sur un domaine privé ne relève pas de sa responsabilité sauf circonstances particulières où cela pourrait présenter un risque pour la population communale (i.e. pollution, ...) ou pour la sécurité publique.

➤ **Fonctionnement et organisation de l'équarrissage**

A l'usine d'équarrissage, les matières sont traitées en continu pour obtenir des produits finis stabilisés : des graisses et des farines de viandes et d'os (FVO) qui vont être envoyées ensuite chez d'autres opérateurs. Après réception des matières dans un endroit clos, la première étape consiste en un broyage et un calibrage. La matière broyée est ensuite cuite (en général dans un bain d'huile). Les paramètres de cuisson (durée, température et pression) peuvent varier d'une usine à l'autre mais doivent respecter certains critères en fonction de la catégorie du sous-produit animal traité. L'eau contenue dans les matières est évaporée, re-condensée et traitée dans la station d'épuration de l'usine. Les matières restantes suite à cette cuisson sont un mélange de protéines (farines) et lipides (graisses).

Après séparation, filtration et purification, il reste des FVO de C1 ou C2 et des graisses de C1 ou C2. Les FVO de C1 sont détruites, incinérées en cimenterie ou dans des incinérateurs dont l'objet est généralement la production de chaleur. Les FVO de C2 sont utilisées en fertilisation. La graisse, qu'elle soit de C1 ou C2 est généralement utilisée dans les filières de biocarburants.

Ces usines sont soumises à un agrément sanitaire au titre de la réglementation relative aux sous-produits animaux, les installations sont classées ICPE (installations classées protection de l'environnement) et les informations de collecte sont transmises par les équarrisseurs dans la base de données du système d'information de la DGAL (Sigal).

En ce qui concerne les différentes espèces animales traitées dans ces usines, les équarrisseurs ont indiqué lors de leur audition que les cadavres de bovins se dégradent beaucoup moins vite au cours de leur stockage que ceux de volailles ou de porcs, qui vont

⁴ <https://www.ancgg.org/especes.asp> lien consulté le 30 avril 2021.

rapidement se liquéfier. Ainsi, en cas de crise et d'afflux de cadavres d'animaux, la présence de nombreux cadavres de porcs ou de volailles posera davantage de problèmes au niveau du processus de traitement que les cadavres de bovins. Pour cette raison, en cas de crise (mortalité élevée touchant plusieurs espèces), les usines sont susceptibles de hiérarchiser les collectes et de collecter en priorité les cadavres les moins impactant sur l'efficacité du processus (les cadavres de bovins seront collectés, au détriment des cadavres de volailles par exemple), ceci pouvant avoir des conséquences sanitaires non négligeables.

De même, les auditions ont révélé que l'application de chaux (vive ou éteinte) sur les cadavres en élevage pose problème. Outre la question de la sécurité des personnes assurant la collecte, la température des bennes peut rapidement monter (audition du 25 mai 2020). Une fois à l'usine, le mélange chaux et graisse va déclencher une réaction de saponification, la matière va mousser, la déshydratation va devenir inopérante et le processus se bloquer.

Pour éviter ces problèmes, en cas d'allongement du délai de collecte, les équarrisseurs ont, au cours de leur audition, préconisé de stocker les cadavres à l'ombre dans les bacs d'équarrissage, de les protéger par de la paille humide (plutôt que des bâches plastiques), de les stocker dans des remorques ou dans des congélateurs ou chambres froides (audition du 25 mai 2020). Il est à noter que le stockage des cadavres dans les centres de collecte ou à l'usine n'est pas prévu dans le processus car les jus générés en cas d'excès de cadavres sont difficilement traités dans le processus de l'usine d'équarrissage (audition du 25 mai 2020).

Des mortalités importantes peuvent résulter de circonstances exceptionnelles telles qu'une épizootie ou une catastrophe naturelle. Les capacités de collecte ou de traitement par les équarrisseurs peuvent alors être dépassées, ou les conditions sanitaires être incompatibles avec cette voie d'élimination (éviter le déplacement des cadavres, inaccessibilité de l'équarrisseur sur le site, etc.).

Les causes infectieuses sont principalement celles responsables de maladies soumises à des Plans Nationaux d'Intervention Sanitaire d'Urgence (PNISU) (décret n° 2012-845 du 30 juin 2012⁵). A cette liste s'ajoutent des agents bactériens (e.g. *Escherichia coli*), des parasites, des virus et des agents transmissibles non conventionnels (e.g. prion), dont certains sont zoonotiques. Parmi ces maladies, certaines sont à l'origine de mortalité de masse très importantes pouvant atteindre des millions d'animaux, du fait de l'impact de l'agent pathogène lui-même, ou des mesures instaurées pour éradiquer la maladie. L'influenza aviaire, la fièvre aphteuse ou encore la diarrhée épidémique porcine font partie des principales maladies infectieuses provoquant des mortalités de masse répertoriées dans le monde (Costa et Akdeniz 2019).

Parmi les causes non infectieuses, outre les mises à mort d'animaux sains à des fins de contrôle d'épizootie ou de zoonoses (e.g. la mise à mort des visons pouvant être des réservoirs de variants du Coronavirus SARS-CoV-2⁶), il existe des causes non infectieuses de mortalité de masse liées aux extrêmes climatiques.

Les canicules correspondent à des périodes de températures anormalement élevées, durant plusieurs jours consécutifs. Ces événements sont donc généralement caractérisés par deux paramètres : un seuil de température qui caractérise l'intensité et une durée qui est le nombre de jours consécutifs au-dessus de ce seuil (Anses 2018b). Il existe des modélisations de la

⁵ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGITEXT000026091113/> lien consulté le 29 juillet 2021.

⁶ <https://fr.euronews.com/2020/11/05/mutation-du-covid-le-danemark-va-abattre-tous-ses-visons>, lien consulté le 24 mars 2021.

mortalité en fonction des conditions climatiques pour les bovins (Anses 2018b). Les informations sont plus difficiles à trouver pour les volailles et le porc.

Lors de crue ou de pluies très abondantes, des inondations d'élevages, en particulier de volailles, ou leur envahissement par des torrents de boue, peuvent survenir. D'autres événements plus anecdotiques (tremblement de terre, tempête, incendies...) peuvent aussi induire des mortalités non infectieuses importantes dans les élevages.

Enfin, des intoxications, par le biais des aliments ou de la boisson, peuvent induire des mortalités importantes. En élevage piscicole d'eau douce, les pollutions accidentelles de cours d'eau représentent la principale cause de mortalité massive (sur un voire plusieurs élevages).

En cas de dépassement des capacités des usines d'équarrissage, le fonctionnement en réseau des usines permet dans un premier temps de délester une partie des cadavres et sous-produits animaux à traiter entre les usines existantes (audition du 25 mai 2020). Si cela s'avère insuffisant, il est possible dans un second temps de solliciter des centres de stockage des déchets ultimes (« CSDU »). Enfin, lorsque les capacités de collecte sont insuffisantes, ou bien s'il est préférable de ne pas déplacer les cadavres, ceux-ci peuvent être enfouis sur le site d'élevage (Figure 2).

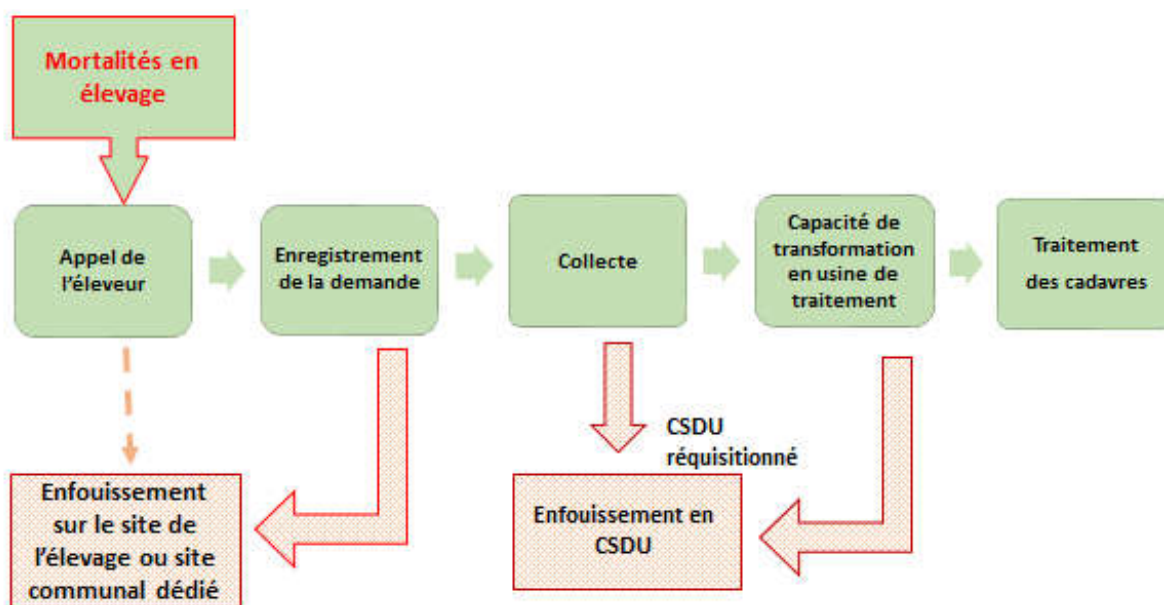


Figure 2 : Schéma de l'organisation générale de l'élimination des cadavres.

Les cases et flèches vertes symbolisent la situation normale, les cases et flèches rouges matérialisent des situations dans lesquelles le processus normal ne peut être suivi et les étapes alternatives envisageables. L'enfouissement sur le site de l'élevage sans appel du service d'équarrissage et sans autorisation des services de l'Etat n'est pas autorisé.

➤ Enfouissement en Centre de Stockage des Déchets Ultimes

Les « CSDU » servent à stocker les déchets ultimes c'est-à-dire ceux dont la part valorisable a déjà été extraite et ceux qu'on ne sait pas valoriser dans des conditions techniques et

économiques acceptables. Il s'agit des déchets industriels banals, des ordures ménagères non valorisables, des boues de station d'épuration, etc. L'enfouissement consiste dans ce cas à stocker les déchets dans des conditions contrôlées réglementairement afin de maîtriser leur impact sur l'environnement au regard du niveau des dangers associés aux déchets. On distingue trois classes de « CSDU » (dénomination ancienne) : les installations de stockage de déchets dangereux (ISDD), non dangereux (ISDND) et inertes (ISDI) dont les exigences techniques sont adaptées aux types de déchets à recevoir. **Dans le présent rapport, la description faite est celle des ISDND (anciennement « CSDU » de classe 2).**

Le « CSDU » est composé de casiers, indépendants sur le plan hydraulique, eux-mêmes composés d'alvéoles, dans lesquelles sont entreposés les déchets. L'étanchéité est assurée par superposition d'une géomembrane en mélange de fibres textiles en polyéthylène haute densité (PEHD) et de matériaux drainants. Les lixiviats⁷ sont récupérés, traités par lagunage puis envoyés en stations d'épuration. Les biogaz générés sont valorisés grâce à une centrale électrique ou calorifique ou brûlés sur place (torchère). La part des animaux morts et sous-produits animaux ne représente qu'une partie infime de ce qui est reçu dans un « CSDU ». Un site enfouit environ 100 000 t de déchets par an. L'acheminement des déchets est sous-traité.

Les déchets entrant sur le site sont tous enregistrés à l'accueil (nom du producteur, poids, etc.). Par contre, dans le site lui-même, il n'y a pas de traçabilité géographique de la zone où les déchets sont déposés. Les procédures de vidage des camions sont très contrôlées (risques avec certains déchets) et la présence de cadavres d'animaux ne modifie pas le processus (audition de Mr Eric Ancel du 16 juillet 2020).

La gestion des lixiviats et des eaux (de ruissellement, de pluie ou apportées par les déchets) sur le site est totalement contrôlée, que ces liquides soient de ruissellement ou apportés par les déchets. La gestion des eaux constitue un des éléments essentiels pour la construction d'un site. Des analyses physicochimiques et bactériologiques sont faites régulièrement sur les lixiviats⁸. Les « CSDU » ont l'habitude de gérer les matières organiques avec la problématique des agents pathogènes qui pourraient être présents dans les déchets ménagers (audition du 16 juillet 2020).

Le schéma de fonctionnement d'un « CSDU » est présenté dans la Figure 3 ci-dessous.

⁷ Les lixiviats correspondent aux liquides, contenant de l'eau, des protéines, des matières grasses, des sels minéraux et des glucides, et parfois des microorganismes pathogènes ou des produits chimiques s'écoulant des corps en décomposition.

https://ccnse.ca/sites/default/files/Cimetieres_distances_de_recul_contamination_eaux_surface-oct_2017.pdf, lien consulté le 11 mai 2021.

⁸ Arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000032275960> lien consulté le 31 mai 2021.

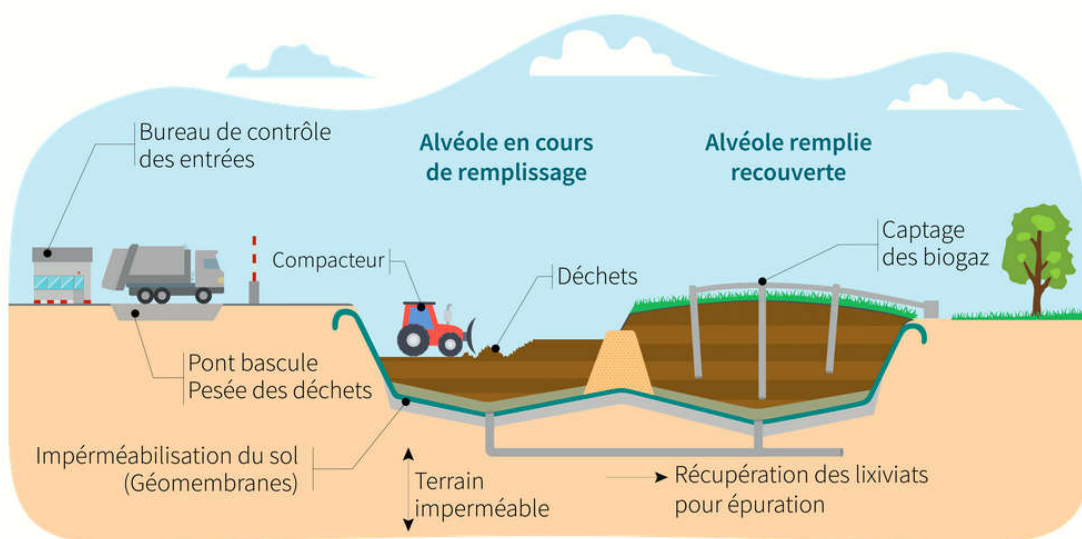


Figure 3 : Schéma du fonctionnement d'un « CSDU » de classe 2 (Source http://www.sydevom04.fr/les_exutoires/le-centre-d-enfouissement/)

La réception et la gestion de cadavres d'animaux en « CSDU » est soumise à une autorisation des services de l'Etat en charge de l'environnement et nécessite la préparation d'une zone d'accueil particulière. Il est arrivé, suite à un épisode de canicule, un incendie⁹ ou une épizootie, que des animaux morts soient pris en charge par les « CSDU » (audition du 16 juillet 2020), les quantités enfouies pouvant aller de quelques tonnes à 150/200 t. Dans ce cas, le site d'enfouissement met en place un sarcophage au niveau d'un casier (environ 5 000 m²) c'est-à-dire une zone de vidage sur la zone de déchets sur laquelle les engins n'auront pas à revenir. Cette petite zone (par exemple 1 000 m²) sera immédiatement recouverte de terre, puis d'autres déchets par la suite. Ce sarcophage permet de vider rapidement les camions en limitant au maximum les interactions entre le personnel et les cadavres. Les engins sont de plus totalement clos, avec pressurisation négative. Recouvrir les cadavres rapidement de terre permet également de limiter l'attractivité pour les oiseaux (mouettes, milans, etc.) souvent présents sur les sites. Le fait d'enfouir des cadavres sur ce type de site étant exceptionnel, il n'y a pas de zone prévue à l'avance à cet effet : tout est préparé à la demande (audition du 16 juillet 2020). De plus, la taille du sarcophage nécessaire dépend de la quantité de cadavres à gérer, ce qui aura un impact en termes de délais de réalisation. Pour un enfouissement de 5 t, la zone est construite en une matinée, tandis que pour 100 t, deux jours seront nécessaires. Il s'agit d'un travail de terrassement auquel les employés de ces structures sont habitués. Une problématique pourrait apparaître si de grandes quantités (> 200/300 t) devaient être enfouies car la zone du casier serait bloquée sur une durée d'une ou deux semaines (audition du 16 juillet 2020). L'enfouissement de grandes quantités de cadavres en urgence nécessiterait de mobiliser en supplément des engins (camions et pelleteuses) et du personnel (en particulier le week-end car les sites sont fermés). Sauf situation de crise identifiée par la préfecture, il serait en effet impératif de maintenir l'activité normale du site car les autres déchets continuent d'être déposés.

⁹ Suite à incendie la problématique amiante s'ajoute à la problématique cadavres, l'amiante libre devant aller sur un site de déchets dangereux (ISDD).

La pratique du chaulage des cadavres sur le site de l'élevage avant enlèvement semble moins problématique pour les « CSDU » que pour les usines d'équarrissage mais nécessite tout de même le respect d'un délai entre l'application de chaux et le dépôt des cadavres au « CSDU ». D'après l'expérience de l'auditionné, il est possible de traiter les cadavres (de poulet dans ce cas) pendant deux à trois jours dans des bennes sur l'élevage (dans des *Body Bennes* ou des *Big Bags*, pouvant assurer un conditionnement étanche) avant la mise en place dans le « CSDU ». Il serait préférable de ne pas apporter dans les centres les animaux traités à la chaux avant ces délais, ceci afin de limiter les dégagements de chaleur et les risques d'incendie.

➤ **Autres modalités de gestion envisageables**

En cas de difficulté de collecte, en plus des mesures précédemment décrites, d'autres mesures de gestion existent et seront détaillées dans le présent rapport.

Jusqu'à récemment, la réglementation¹⁰ prévoyait que, « *par dérogation à l'article L. 226-2, dans les zones de pâturage estival en montagne et en cas de force majeure, ou en cas de nécessité d'ordre sanitaire, constatées par l'autorité administrative, il soit procédé à l'élimination des cadavres d'animaux par incinération sur place ou par enfouissement (hors CSDU).* » Il pouvait « *également être procédé à l'enfouissement des cadavres d'animaux familiers et de sous-produits de gibiers sauvages* ».

Dans tous les cas, le recours aux méthodes autres que l'équarrissage ou le transport des cadavres dans un « CSDU » sera effectué en concertation avec la DGAL, selon l'analyse de la situation, et les modalités d'élimination (ou de traitement) des cadavres devront être précisées dans l'arrêté préfectoral portant déclaration d'infection (APDI) du foyer (ou dans un arrêté préfectoral complémentaire) ou dans l'arrêté préfectoral de zone si la mortalité concernait plusieurs départements.

Les dispositions des PNISU recommandent d'anticiper les besoins en amont, et notamment d'identifier, avec l'aide du Service interministériel de défense et de protection civile (SIDPC) de la Préfecture, les partenaires publics ou privés qui pourraient être sollicités, de les sensibiliser et de définir les conditions de leur appui (des conventions ou des marchés peuvent être passés).

¹⁰ Article L226.4 du CRPM abrogé par Ordonnance n°2015-616 du 4 juin 2015.

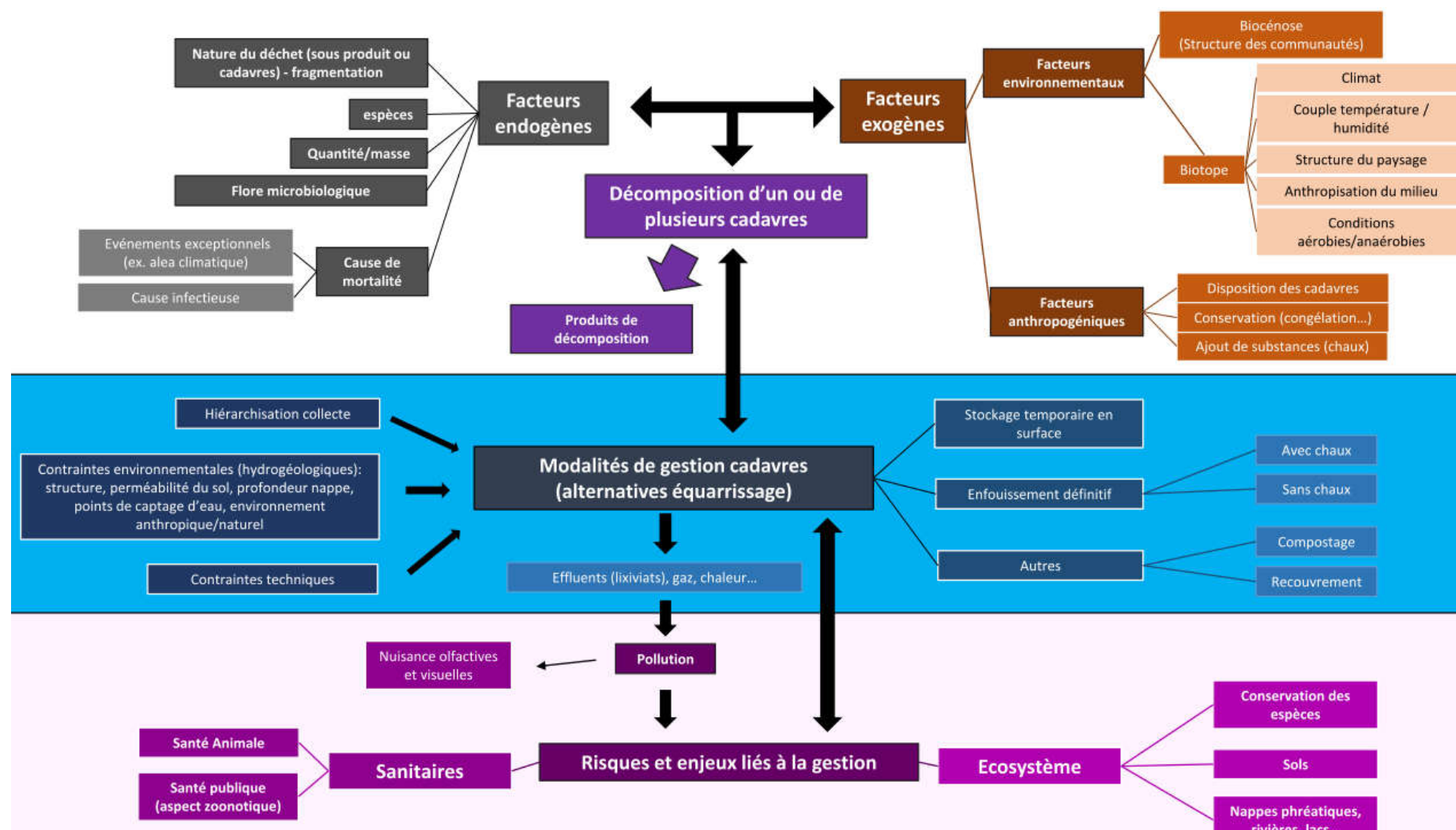


Figure 4 : Schéma évènementiel

Les différents éléments pris en considération dans le présent rapport sont représentés sur le schéma de la Figure 4.

Les aspects relatifs à la décomposition des cadavres sont représentés dans la partie supérieure (au-dessus de l'encadré bleu). Les facteurs pouvant avoir un impact sur la cinétique de décomposition et l'évolution microbiologique d'un cadavre ont été divisés en :

- facteurs endogènes (espèce considérée, quantité de cadavres, flore microbiologique, cause de mortalité...) qui sont indiqués en haut à gauche, dans les encadrés grisés ;
- et facteurs exogènes (facteurs environnementaux principalement, liés à la biocénose ou au biotope, ou anthropogéniques) représentés en haut à droite, dans les encadrés bruns.

Les facteurs exogènes et endogènes interagissent entre eux, et finalement sur le processus de décomposition (voir paragraphe 3.5).

Les modalités de gestion des cadavres sont représentées sur la partie médiane du schéma, dans l'encadré bleu (voir partie 4). Les modalités de gestion dépendent d'un certain nombre de contraintes (différentes selon la modalité envisagée et des quantités de cadavres à prendre en charge) et aussi en partie du stade de décomposition des cadavres, sachant que la modalité choisie aura un impact sur le processus de décomposition. Les modalités envisagées comprennent à la fois des modalités de gestion temporaires (stockage) ou des modalités définitives (notamment enfouissement mais aussi recouvrement en surface ou encore compostage). L'impact du recours à la chaux, en particulier sur des cadavres enfouis, a fait l'objet d'une analyse spécifique dans le cadre du traitement de cette saisine (voir paragraphe 4.3).

La partie inférieure du schéma, en rose, représente les risques sanitaires (pour la santé animale et/ou la santé publique) et ceux sur l'écosystème qui découlent de la gestion de cadavres (voir paragraphe 3.6).

Ce schéma général a servi de support à la réflexion conduite au sein du GT, les différents points sont détaillés dans les parties suivantes.

3 Décomposition des cadavres et évolution microbiologique *post mortem*

L'objectif de cette partie est d'explicitier les mécanismes et facteurs influençant la dégradation des cadavres et l'évolution *post mortem* de la communauté de microorganismes. Les autres parties pourront se référer à celle-ci pour les mécanismes.

La décomposition des cadavres dépend de nombreux facteurs endogènes (espèce, masse, etc.) et exogènes (environnement, conditions climatiques, etc.). De manière générale, on peut retenir que la prolifération microbienne et la présence d'insectes, y compris *ante mortem* (infections et exposition du cadavre), ainsi que la présence de lésions (fragmentation des cadavres) sont corrélées à une décomposition rapide (Bachmann et Simmons 2010; Dent, Forbes et Stuart 2004; Whittington 2019). A l'inverse, la décomposition est ralentie en cas d'enfouissement profond (supérieur à un mètre) du fait de l'absence de charognards et d'insectes, des basses températures dans le sol et de l'absence d'oxygène (Dent, Forbes et Stuart 2004; Janaway 1997; Polson, Gee et Knight 1985). Dans certaines conditions (atmosphère froide et humide), la formation d'adipocire¹¹ stoppe également les processus de putréfaction et la décomposition (Fiedler et Graw 2003).

La plupart des études portant sur la décomposition des cadavres ont pour finalité d'être utilisables en criminologie (notamment dans le cadre de la mise au point de méthodes de datation de la mort de l'individu). Ainsi, les études portent essentiellement sur des cadavres humains. Quand les études portent sur l'animal, c'est l'espèce porcine qui est la plus fréquemment utilisée, du fait de similitudes anatomiques et physiologiques avec l'espèce humaine, ceci afin de pouvoir extrapoler les résultats obtenus à celle-ci. De plus, les références citées n'ayant pas pour objectif de répondre directement aux questions de la saisine, les informations qu'elles apportent ne sont que parcellaires.

3.1 Description des étapes de décomposition

Lorsque les cadavres sont accessibles (accès physique mais également conditions climatiques favorables), les charognards (vertébrés) et les insectes sont les principaux décomposeurs. Leur activité masque alors un processus de décomposition plus lent : la putréfaction. La putréfaction est due à la décomposition et la liquéfaction des tissus organiques sous l'influence des microbes, levures et moisissures.

Le processus de décomposition des cadavres peut être décrit de manière quantitative ou qualitative. Du point de vue quantitatif, la règle dite *de Casper* est censée permettre d'estimer la décomposition d'un cadavre enfoui (Casper 1861) : « *A une température moyenne similaire, le niveau de putréfaction d'un corps après une semaine (ou mois) de repos à l'air libre correspond à celui d'un corps dans l'eau durant deux semaines (ou mois), ou en terre pendant*

¹¹ Savon ammoniacal résultant de l'altération des lipides au cours de la décomposition cadavérique (gras des cadavres), souvent observé au cours des submersions prolongées ou après inhumation dans une terre humide et froide. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/adipocire/1081> lien consulté le 5 février 2021.

huit semaines (ou mois). » Malheureusement, cette règle simpliste est rarement vérifiée. De façon très approximative, la vitesse de décomposition de la matière organique peut être résumée par l'équation $y = \exp(-kt)$, où « y » est la masse de cadavres restantes et « k » est le taux de décroissance par unité de temps (t). Le taux de décomposition des feuilles se situe généralement entre $k = 0,1$ et 4 (par année), tandis que la décomposition des cadavres d'animaux est 10 à 100 fois plus rapide (Barton *et al.* 2019).

Il est également possible de décrire le processus de décomposition des cadavres de façon qualitative (aspect du cadavre et faune associée). L'évolution du cadavre est un processus continu, comme illustré sur la Figure 5, mais il est possible, sur l'aspect visuel, de distinguer cinq stades, décrits ci-dessous.

Le jeune cadavre (1) est décrit comme frais : le corps n'a pas encore refroidi et présente l'aspect du vivant. La rigidité (fixation des membres dans leur posture initiale) et les lividités (coloration violacée dans les zones basses, hormis au niveau des points de pression) apparaissent dans les heures qui suivent le décès. Ces phénomènes sont liés aux processus d'autolyse¹², et s'estompent progressivement avec la prolifération des bactéries indigènes aérobies, qui abaissent progressivement le potentiel redox (appauvrissement en oxygène). Les souches anaérobies du tube digestif prennent alors le relais et remplissent l'abdomen de gaz (fermentation) : un gonflement de l'abdomen et le début de la putréfaction est alors observé (2) (Bergmann, Ralebitso-Senior et Thompson 2014). En surface et au niveau des orifices, l'activité des insectes devient bien visible et d'importantes masses d'asticots peuvent être observées. L'étape suivante est la putréfaction avancée (3), qui correspond à la décomposition aérobie (e.g. en présence d'oxygène, contrairement à la fermentation qui est dite anaérobie) et la liquéfaction des organes. L'écoulement des liquides provenant des organes, amplifié par l'action des larves nécrophages qui créent des brèches, induit une baisse du ballonnement, puis la dessiccation progressive (4) et enfin la squelettisation (5).

¹² Destruction des tissus vivants par leurs propres enzymes, sans agent extérieur : cadavres, fruits en postmaturité. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/autolyse/6745> lien consulté le 27 avril 2021.

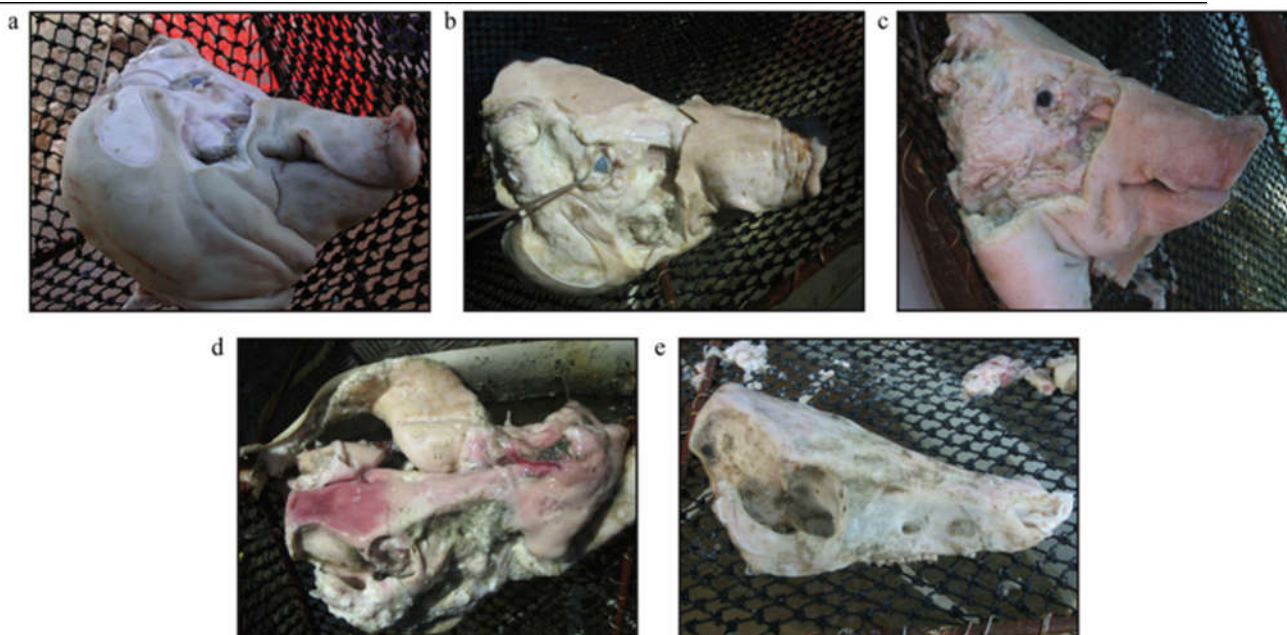


Figure 5 : Résumé des différents stades de décomposition de cadavres de suidés (a : cadavre frais, b : début de putréfaction, c : putréfaction avancée, d : dessiccation avancée, e : squelettisation) (Dickson et al. 2011)

3.2 Les voies de décomposition

La disponibilité de l'oxygène est un paramètre fondamental de la cinétique de décomposition puisqu'après la mort, les microorganismes présents dans les intestins, les voies respiratoires et la peau envahissent les tissus du cadavre. Or, les bactéries aérobies épuisent rapidement l'oxygène et créent des conditions favorables pour les microorganismes anaérobies. Ces microorganismes sont souvent issus du tractus digestif mais peuvent également provenir de l'air et du sol (bactéries telluriques), notamment durant les dernières étapes de la décomposition.

A l'inverse, certaines conditions (froid, humidité) stoppent les processus de putréfaction et de décomposition entraînant la formation d'adipocire. L'adipocire se forme suite à la conversion de la graisse en résidus lipidiques résistants souvent qualifiés de savon ou de cire (saponification). Dans un premier temps, les graisses sont décomposées en acides gras libres (saturés ou insaturés). Cette réaction hydrolytique nécessite la présence d'eau, ainsi, l'observation d'adipocire est souvent associée à des environnements humides. Les acides gras vont ensuite réagir avec les produits ammoniacaux générés pendant la décomposition pour former des sels d'ammonium solubles. Ces sels possèdent une grande affinité pour les métaux alcalins (Na, K, Ca and Mg). De par leur association, des sels alcalins insolubles sont ensuite générés. Lorsque les conditions sont favorables à la saponification (froid, humidité par exemple), les réactions débutent rapidement. Si les conditions environnementales restent favorables à la saponification, et que le processus se poursuit, la formation de l'adipocire est visible sur tout ou partie du cadavre en quelques semaines. Dans le cas contraire, les parties non saponifiées peuvent reprendre un processus de décomposition. L'adipocire est

imperméable, étanche à l'air et thermiquement isolée ce qui explique sa grande résistance à la décomposition¹³ (Fiedler et Graw 2003; Forbes, Stuart et Dent 2005; Takatori 1996).

De la même manière, des conditions propices à la dessiccation (atmosphère sèche, air chaud et ventilation) peuvent entraîner une momification du cadavre. De telles conditions ne se rencontrent pas lors de l'enfouissement des cadavres.

De manière générale, un environnement oxygéné augmentera le taux de décomposition.

Les différentes voies de décomposition sont synthétisées sur la Figure 6 ci-dessous. Les conditions environnementales orientant vers un arrêt du processus de décomposition par momification ou formation d'adipocire y sont indiquées. Lorsque ces conditions particulières ne se rencontrent pas, le processus la décomposition se poursuit.

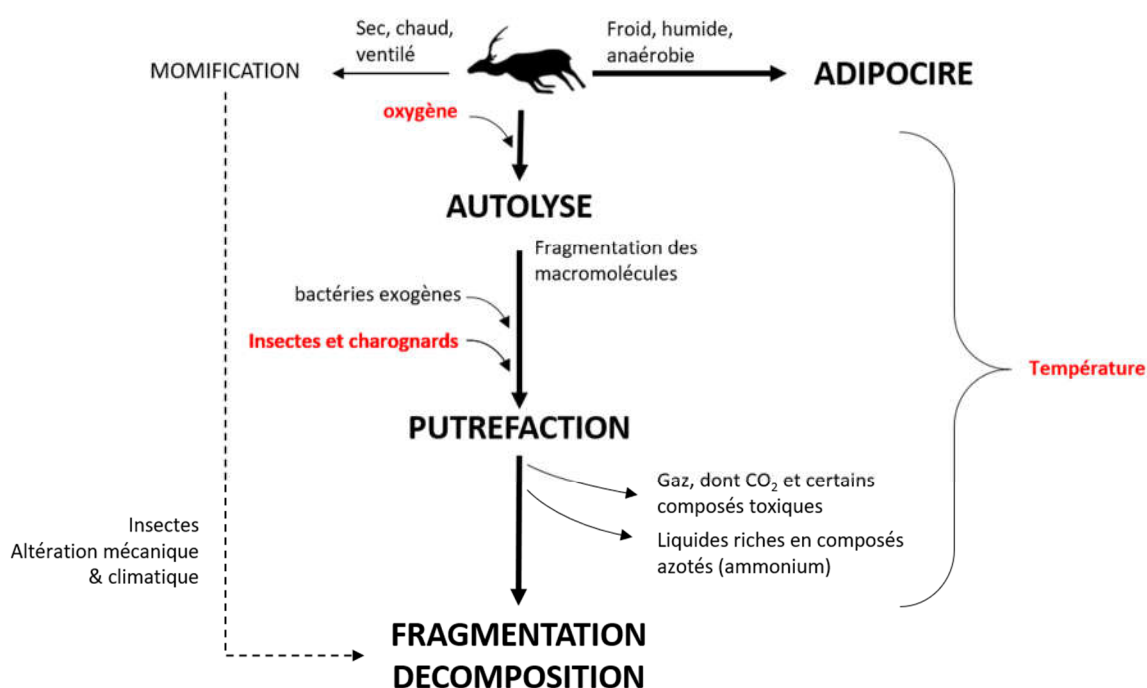


Figure 6 : Représentation des différentes étapes de la décomposition d'un cadavre (Source D. Charabidze)

3.3 Evolution microbiologique au cours de la décomposition

Après la mort, la population microbienne présente du vivant de l'animal évolue du fait des phénomènes de translocation et de l'interaction avec les êtres vivants du sol (en particulier les nématodes, les champignons et les amibes). Les bactéries proviennent à la fois du sol, du cadavre (tube digestif, peau, agents infectieux potentiellement présents) et des arthropodes (Beans 2018).

Le suivi des flores lors de la décomposition s'effectue soit par prélèvement sur ou dans le corps soit par prélèvement dans le sol sous le corps (contaminé par les lixiviats) reflet des

¹³ La présence d'adipocire a permis de retrouver des corps âgés de 7 000 ans.

bactéries issues du cadavre en décomposition. Les techniques employées pour l'étude de l'évolution microbiologique des cadavres sont assez variées et ont évolué au cours du temps et de l'approche méthodologique de la microbiologie. Les méthodes les plus anciennes ont fait appel aux approches de culture aérobie (Aneyo *et al.* 2020) et anaérobie avec identification biochimique, moléculaire ou protéique¹⁴. Les méthodes les plus récentes permettent l'analyse du nécrobiome, avec différentes approches haut débit : création de librairies d'ARN 16S et ARNm, séquençage par différentes techniques (NGS (*next generation sequencing*) ; 454 *pyrosequencing* ;), protéomique, métagénomique, métabolomique (Finley *et al.* 2016; Metcalf, Carter et Knight 2016; Pechal *et al.* 2014; R. Zhou *et al.* 2021).

Les études portent très souvent sur les lixiviats récoltés sous les cadavres, qu'ils soient enfouis ou déposés sur le sol. Ces études portent sur l'être humain (Hyde *et al.* 2015; Vass 2001) ou fréquemment sur l'espèce porcine (Aneyo *et al.* 2020; Metcalf, Carter et Knight 2016; Spicka *et al.* 2011). D'autres modèles animaux plus rares (carpe, bovin, rat, souris) sont également étudiés (Lauber *et al.* 2014; Metcalf *et al.* 2013; Pechal *et al.* 2014; R. Zhou *et al.* 2021; R. Zhou *et al.* 2019). Il est généralement admis que le porc est un bon modèle pour la médecine légale humaine (Pechal *et al.* 2014), même si ce postulat ne fait pas l'unanimité car les étapes de décomposition chez cette espèce diffèrent sensiblement de celles décrites chez l'être humain (Dautartas *et al.* 2018).

Le nécrobiome¹⁵ (ou thanatomiobiome, thanatobiome) évolue en fonction des étapes de décomposition (Metcalf 2019). Les études du nécrobiome ont souvent pour objectif de permettre d'évaluer l'intervalle de temps *post mortem* chez l'être humain ou certains animaux en médecine légale (Brooks 2016).

En général, les microorganismes aérobies utilisent l'oxygène disponible dans les tissus, mais à mesure que l'oxygène s'épuise, l'environnement favorise les microorganismes anaérobies. Par conséquent, la décomposition des mammifères peut inclure une succession prévisible de microbes qui reflète les différentes étapes de la fonction métabolique et les voies de décomposition. En effet, plusieurs études ont démontré, lors de la décomposition des cadavres de mammifères terrestres, des changements prédictibles dans la composition de la communauté microbienne associée à la peau (Metcalf *et al.* 2013; Pechal *et al.* 2014), aux sites gastro-intestinaux/rectaux (DeBruyn et Hauther 2017; Hauther *et al.* 2015; Hyde *et al.* 2015; Metcalf, Carter et Knight 2016; Metcalf *et al.* 2013; Pechal *et al.* 2018), aux sites oraux (Hyde *et al.* 2015; Pechal *et al.* 2014; Pechal *et al.* 2018), aux cavités nasales, yeux et oreilles (H.R. Johnson *et al.* 2016; Pechal *et al.* 2018), organes internes (Javan *et al.* 2016), aux os (Damann, Williams et Layton 2015), et aux sols associés aux cadavres (Cobaugh, Schaeffer et DeBruyn 2015; Finley *et al.* 2016; Metcalf, Carter et Knight 2016; Metcalf *et al.* 2013).

Selon les études (espèces animales, mode d'enfouissement ou de dépôt sur le sol voire compostage, système expérimental, méthodes d'étude bactériologique, etc.) les résultats diffèrent et sont parfois contradictoires. L'évolution dépend de la nature du sol (Han *et al.* 2018), de l'environnement du cadavre (eau, terre, etc.) et de paramètres physico-chimiques (humidité, température, pH). D'ailleurs, à l'heure actuelle, l'intervalle *post mortem* chez l'être humain est quasiment impossible à établir de façon précise à l'aide de l'évolution bactériologique/microbiologique.

¹⁴ RT-PCR amplification de l'ARN 16S ; MALDI-TOF (*Matrix Assisted Laser Desorption Ionization - Time of Flight*) ; suivi DGGE (*Denaturing gradient gel electrophoresis* ; Metcalf, 2016 ; Bergmann, 2014).

¹⁵ Écosystème *post-mortem* (i.e. propre au cadavre) composé de microorganismes, d'arthropodes et de vertébrés qui interagissent entre eux et participent à la décomposition du corps http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26543890 lien consulté le 5 février 2021.

Il ressort néanmoins de ces nombreuses études que les groupes bactériens qui prédominent sont : les *Proteobacteria* et les *Firmicutes* ; les *Proteobacteria* précédant les *Firmicutes* (M. E. Benbow *et al.* 2015; Hyde *et al.* 2015; Metcalf 2019) (Figure 7).

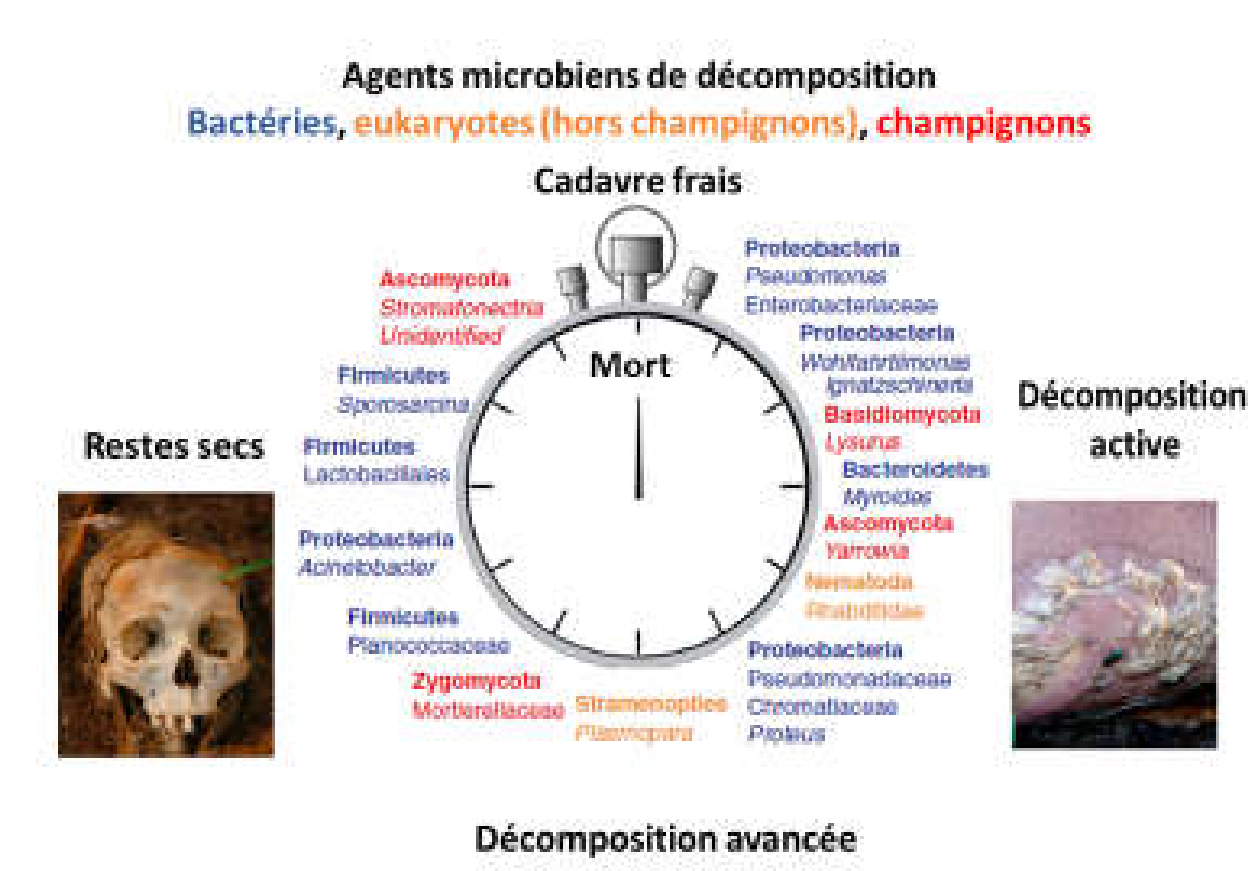


Figure 7 : Agents microbiens de la décomposition d'un cadavre humain (d'après Metcalf 2016)

Chez le Porc (*Sus scrofa domesticus*), la diversité bactérienne, la richesse et l'abondance¹⁶ des espèces dans les couches moyennes et inférieures du sol d'essai lors de la décomposition d'une la patte d'un porc augmentent entre le jour 3 et le jour 28 (Bergmann, Ralebitso-Senior et Thompson 2014). Les communautés bactériennes se modifient en fonction du temps *post mortem* : une première phase durant la période 0 à 6 semaines *post mortem* pendant laquelle 17 espèces appartenant principalement aux *Proteobacteria* se sont ajoutées à la flore existante à J0. Seules deux espèces de *Firmicutes* apparaissent pendant cette période. Une deuxième phase de 6 à 17 semaines se traduit par l'apparition de nouvelles espèces appartenant aux *Proteobacteria*, se rajoutant à une dizaine d'espèces du même phylum déjà présentes. Les genres dominants sont *Pseudomonas* et *Psychrobacter*. Pendant la dernière période allant de 17 à 21 semaines, les *Proteobacteria* sont encore dominantes, mais il n'y a plus qu'un genre dominant parmi les différentes espèces et le phylum des *Firmicutes* se renforce (Iancu *et al.* 2015). Une autre étude s'intéressant aux bactéries aérobies seulement indique une période d'évolution différente : les dénombrements des bactéries aérobies isolées

¹⁶ La richesse peut se définir comme le nombre d'OTUs (*Operational Taxonomic Unit*) retrouvé dans l'échantillon. L'abondance (nombre d'OTU par genres/espèces) et la richesse caractérisent la diversité des genres/espèces. La diversité est évaluée par au moins deux indices : l'indice de Shannon et l'indice de Simpson. <https://louernos-nature.fr/indices-de-diversite-ecologie-ecosystemes> lien consulté le 27 avril 2021.

de cadavre porcin expérimental ont montré deux périodes de pointe commençant le jour 5, puis une baisse constante entre le jour 9 et le jour 21, puis ont culminé à nouveau le jour 28, pour s'écrouler finalement au jour 35 (Aneyo *et al.* 2020). Cependant les études ne sont pas unanimes et une étude fait état d'une dominance de *Firmicutes* par rapport aux protéobactéries en termes de nombre d'espèces ou de famille (Dibner, Mangca Valdez et Carter 2019). Enfin, la succession de certaines familles lors de la décomposition de cadavres permet d'établir des modèles prédictifs temporels distincts par des changements significatifs dans leur abondance relative pendant le processus de décomposition (Pascual *et al.* 2017).

D'autres auteurs ont étudié la décomposition de 14 cadavres humains posés sur le sol et quatre autres enfouis à 45 cm à partir de prélèvements de sol réalisés pendant un an, entre les jambes des cadavres en surface et sous le crâne et les pieds des cadavres enfouis, analysés par séquençage de l'ARN 16S (Finley *et al.* 2016). Les *Proteobacteria*-, *Actinobacteria*- et *Acidobacteria* étaient les groupes les plus représentés dans tous les échantillons. Les ratios d'*Acidobacteria* et *Verrucomicrobia* étaient moins élevés chez les cadavres en surface. Cette étude confirme les résultats de Roesch indiquant que les protéobactéries sont le phylum le plus représenté dans tous les types de sol. Au cours du temps, les bactéries Rhodospirillales ont été davantage détectées, tout comme les Burkholderiales et les Lactobacillales (Roesch *et al.* 2007). Hyde *et al.* ont étudié les premières semaines de décomposition de deux cadavres à partir de prélèvements quotidiens variés : écouvillons de la bouche, de la surface des joues, des biceps, du torse et région fécale (Hyde *et al.* 2015). Initialement, les prélèvements de peau étaient majoritairement contaminés par des protéobactéries, représentant 60 à 80 % de la biomasse pendant les deux premiers jours de décomposition. Les *Firmicutes* se sont multipliés pendant les phases plus tardives ainsi que les *Actinobacteria* (moins abondantes au départ). Dans les prélèvements fécaux, les *Firmicutes* et *Bactéroïdètes* étaient plus abondants, avec des différences de genres bactériens associés aux microbiotes individuels (présence de *Clostridium* chez un des cadavres étudiés).

La décomposition des poissons est le fait du nécrobiome formé de bactéries qui proviennent du tube digestif et des branchies et dans une moindre mesure de l'environnement (eau et sédiment). Comme pour les systèmes terrestres, les *Firmicutes*, *Bactéroïdètes* et *Gammaproteobacteria* prédominent dans la décomposition.

Au jour 1 de la décomposition, *Aeromonas* (*Proteobacteria*) et *Clostridium* (*Firmicutes*) prédominent puis viennent les *Enterobacteriaceae* (*Proteobacteria*). Ce sont les groupes bactériens présents habituellement dans le tube digestif des poissons. Au jour 4, la composition de la flore bactérienne est fortement modifiée : développement des *Proteobacteria*, *Firmicutes* et *Bactéroïdètes* avec augmentation des genres *Acetobacteroides* et *Alistipes* (*Bactéroïdètes Rickenellaceae*) qui deviennent dominants et apparition des Sélénomonadales (*Firmicutes* genres *Pelosinus* et *Anaerosinus*) qui augmentent en proportion jusqu'au jour 10 (Lobb *et al.* 2020).

Enfin, des études menées sur des souris ont montré que la décomposition est deux à trois fois plus rapide lorsque les sols comportent des communautés bactériennes par comparaison au même sols stériles (Lauber *et al.* 2014). Dans cette espèce animale, 40 familles bactériennes ont été détectées dont les deux plus fréquentes sont les *Lactobacillaceae* et les *Clostridiaceae* avec des différences en fonction du temps (Burcham *et al.* 2019).

Le microbiome présent du vivant de l'animal évolue après la mort vers le nécrobiome du fait des phénomènes de translocation et de l'interaction avec les êtres vivants du sol.

Les techniques employées pour l'étude du nécrobiome et de son évolution sont assez nombreuses. Les études concernent principalement les espèces humaine, porcine et, dans une moindre mesure, d'autres espèces animales (poissons, volailles, lapins...).

Le nécrobiome change en fonction des étapes de décomposition du cadavre et a été exploré pour établir l'intervalle *post mortem* d'un cadavre. En général, les microorganismes aérobies utilisent l'oxygène initialement disponible dans les tissus, puis l'oxygène s'épuisant, l'environnement favorise les microorganismes anaérobies. Des changements dans la composition de la communauté microbienne apparaissent donc et concernent différents organes (peau, cavité buccale et nasale...). Mais les résultats diffèrent selon les études et sont parfois contradictoires. Cette évolution dépend en effet de la nature du sol, de l'environnement du cadavre (eau, terre, etc.) et de paramètres physico-chimiques (humidité, température, pH). Il ressort néanmoins de nombreuses études que les groupes bactériens qui prédominent sont les *Proteobacteria* et les *Firmicutes*, les *Proteobacteria* précédant les *Firmicutes* aussi bien chez l'être humain que chez le porc. Le nombre et la prédominance de certains genres bactériens évoluent au cours du temps.

3.4 Produits de dégradation des cadavres

Les produits de dégradation des cadavres peuvent être liquides (les fluides cadavériques) ou gazeux (les odeurs cadavériques). En ce qui concerne les odeurs, plusieurs centaines de composés organiques volatils (COVs) sont émis lors de la décomposition d'un corps (+/- 800 COVs). Ils sont issus de la dégradation des différents tissus : les protéines, les lipides et les sucres. Pratiquement toutes les familles chimiques de composés sont retrouvées : cétones, aldéhydes, acides carboxyliques, composés soufrés et aminés, alcanes, alcènes, etc. Ces émissions évoluent tout au long de la décomposition. Ainsi, il est possible sur la base du profil odorant de déterminer le stade de décomposition (Dekeirsschieter *et al.* 2009). Certains de ces COVs représentent une source de nuisance et/ou de toxicité. Par exemple, la putrescine et la cadavérine peuvent être toxiques et ont une odeur fétide, de même que le sulfure d'hydrogène et le méthane (Gill King 1997). Les gaz et composés issus de ce processus peuvent entraîner une augmentation de volume important des cadavres, pouvant même entraîner une remontée des cadavres à la surface des zones d'enfouissement si ceux-ci n'étaient pas percés au préalable.

Par ailleurs, des fluides (lixiviats) s'écoulent rapidement des cadavres et peuvent être à l'origine de contaminations environnementales. Il a été estimé que 50 % des fluides disponibles s'écoulaient des cadavres au cours de la première semaine de décomposition (Australia 2015). Cependant, cette donnée n'est pas toujours vérifiée et, dans une étude visant à évaluer l'impact de l'enfouissement et à analyser les lixiviats produits au cours du processus de décomposition, ceux-ci n'ont été produits en quantité significative qu'à partir de 370 jours sur les cadavres de bovins suivis (une production de lixiviats a bien eu lieu la première année mais est restée limitée) (Qi Yuan, Snow et Bartelt-Hunt 2013b). La quantité de lixiviats produite dépend de la masse de cadavres en décomposition mais aussi probablement de l'espèce concernée.

3.4.1 Décomposition des protéines

Les protéines sont présentes dans tous les tissus corporels et décomposées par l'action d'enzymes (protéolyse), ce qui conduit à la production de substances phénoliques comme le skatole et l'indole, et de gaz tels que le dioxyde de carbone, le sulfure d'hydrogène, l'ammoniac et le méthane (Evans 1963). Ces processus ne se déroulent pas à un rythme uniforme et, par conséquent, certaines protéines sont dégradées au début de la décomposition, tandis que d'autres le sont plus tardivement. La vitesse à laquelle la protéolyse se déroule dépend en grande partie de l'humidité, de la température et de l'action des bactéries. En effet, les processus de décomposition sont favorisés en milieu humide et la dégradation des protéines augmente avec la température (Dekeirsschieter *et al.* 2009; Janaway, Percival et Wilson 2009; Paczkowski et Schütz 2011). Les bactéries protéolytiques les plus courantes sont *Pseudomonas*, *Bacillus* et *Micrococcus* (Higgins et Burns 1975).

Des conditions anaérobies, comme dans le cas des cadavres enterrés, favorisent par exemple la production de sulfure en quantités considérables. Les thiols ou les mercaptans sont des gaz de décomposition qui se distinguent par leur odeur désagréable.

Au cours de la décomposition, les acides aminés sont éliminés de la structure tertiaire des protéines par les protéases microbiennes et la peptidase (Dekeirsschieter *et al.* 2009; Janaway, Percival et Wilson 2009; Paczkowski et Schütz 2011). Les acides aminés libres conduisent à l'émission de groupes spécifiques de composés organiques volatiles (Dekeirsschieter *et al.* 2009; Paczkowski et Schütz 2011; Vass *et al.* 2002). Par exemple, la dégradation de la leucine, de l'isoleucine et de la thréonine libère des alcools supérieurs (alcools à chaîne ramifiée et 1-propanol) par la voie d'Ehrlich et la fermentation de micro-organismes (levures et bactéries) (Paczowski et Schütz 2011; Rosier *et al.* 2016). La dégradation de l'arginine, de la lysine et du tryptophane produit des composés azotés (ex Indole) par décarboxylation et par l'activité de micro-organismes (Dent, Forbes et Stuart 2004; Paczkowski et Schütz 2011). Les acides aminés contenant du soufre (cystéine et méthionine) subissent une hydrodésulfuration et une dégradation bactérienne pour produire des composés soufrés, tels que le méthane-thiol et le disulfure de diméthyle, qui sont des biomarqueurs typiques de la décomposition des vertébrés (Dekeirsschieter *et al.* 2009; Dent, Forbes et Stuart 2004; Paczkowski et Schütz 2011; Rosier *et al.* 2016). Composés aromatiques et acides organiques sont également libérés lors de la dégradation de divers acides aminés, sans être spécifiques à certains d'entre eux (Paczowski et Schütz 2011).

Certaines protéines résistent à la dégradation en raison de leur capacité à se lier à d'autres molécules. Par exemple, dans les os, les composés minéraux (comme le calcium) inhibent la dégradation des structures protéiques et contribuent à leur préservation, alors que les protéines du cerveau sont rapidement décomposées (Gill King 1997; Janaway 1997).

L'azote est présent dans les protéines en tant que constituant des acides aminés. Ceux-ci sont facilement utilisés par la plupart des microbes du sol comme source d'énergie. L'azote est alors libéré sous forme d'ammoniac. Cet ammoniac peut être utilisé par des plantes supérieures ou divers microbes, être converti en nitrates, s'accumuler dans le sol ou rejoindre les eaux souterraines (voir partie 3.6 du présent rapport).

La transformation de l'ammoniac en nitrites et nitrates est inhibée par un pH élevé ou l'ajout de chaux, et s'arrête complètement en conditions anaérobies (Bolt et Bruggenwert 1978; Gray et Williams 1971; Higgins et Burns 1975). L'ammoniac s'accumule alors dans le sol.

3.4.2 Décomposition des graisses

Les lipides sont largement présents dans les membranes cellulaires des vertébrés, et les tissus adipeux, tels que la graisse intramusculaire et les dépôts graisseux sous la peau. La fraction lipidique des vertébrés est principalement composée de triglycérides (90–99 %) (Janaway, Percival et Wilson 2009). Lors de la décomposition, l'hydrolyse des triglycérides produit du glycérol et des acides gras. La dégradation du glycérol forme ensuite du pyruvate, qui se décompose en alcools volatils et en acides organiques (Boumba, Ziavrou et Vougiouklakis 2008; Paczkowski et Schütz 2011). Les acides gras sont décomposés en plusieurs COVs, mais subissent également un processus de saponification, en particulier dans des conditions basiques ou en présence de bactéries anaérobies (Notter *et al.* 2009). Les acides gras sont décomposés par hydrolyse et oxydation, les deux se produisant simultanément, mais l'importance relative de chacun est déterminée par des facteurs environnementaux, tels que l'accès à la lumière et à l'oxygène. Les champignons et les bactéries peuvent contribuer à cette partie du processus de décomposition ; cependant, aucun n'a été précisément identifié agissant sur la décomposition des acides gras (Dent, Forbes et Stuart 2004). Le manque d'études détaillées rend difficile la clarification des produits métaboliques de la dégradation des lipides mais celle-ci entraîne probablement l'émission d'alcools volatils, d'acides organiques, de cétones, d'aldéhydes et d'esters (Boumba, Ziavrou et Vougiouklakis 2008; Dent, Forbes et Stuart 2004; Paczkowski et Schütz 2011). La décomposition de l'adipocire libère principalement des acides carboxyliques et des esters d'acides. De plus, certains composés sulfurés, dont le disulfure de diméthyle et le trisulfure de diméthyle, ont été identifiés en grande quantité (Dubois *et al.* 2018).

3.4.3 Décomposition des hydrates de carbones

Les microorganismes convertissent les glucides en énergie grâce à deux mécanismes : la voie glycolytique Embden-Meyerhof-Parnas (EMP) et la voie Entner-Doudoroff (ED). La voie EMP est le type de glycolyse le plus courant qui se produit chez les mammifères, les plantes et de nombreux microorganismes, comme les bactéries et les levures. La voie ED est répandue chez les bactéries Gram négatives. Les deux voies produisent de l'adénosine triphosphate (ATP) et du pyruvate. Dans les levures et les bactéries, la fermentation du pyruvate produit soit de l'éthanol, soit de l'acide acétique, en plus d'autres acides organiques volatils (par exemple l'acide butanoïque) et des alcools (par exemple le propanol) (Boumba, Ziavrou et Vougiouklakis 2008; Paczkowski et Schütz 2011). Chez les champignons, la fermentation du pyruvate produit également des acides organiques volatils. Les bactéries contribuent à deux processus de dégradation, selon la disponibilité de l'oxygène : (1) dans des conditions anaérobies, des acides organiques et des alcools sont libérés, et (2) dans des conditions aérobies, des aldéhydes, des acides organiques et du dioxyde de carbone sont libérés (Boumba, Ziavrou et Vougiouklakis 2008; Dent, Forbes et Stuart 2004). Les bactéries anaérobies obligatoires de la famille des clostridiacées colonisent rapidement les cadavres, car elles sont largement présentes dans les intestins et couches anaérobies du sol. A partir du pyruvate, elles forment des alcools (e.g. l'éthanol, le butan-1-ol) et des acides organiques (e.g. l'acide acétique, l'acide butanoïque). Les bactéries anaérobies facultatives de la famille des *Enterobacteriaceae* fermentent le pyruvate en acides organiques et en alcools. Cependant, les intestins ne sont pas la seule partie du corps où se trouvent les bactéries. Par exemple,

les *Streptococaceae* et les *Enterococaceae* sont présentes dans le système respiratoire, où elles fermentent les glucides en acide lactique, acide acétique et éthanol. Ces bactéries produisent des gaz organiques et inorganiques qui font gonfler les cadavres, à l'origine du stade de gonflement (deuxième étape de la décomposition, voir 3.1). Lorsque la peau se brise, les fluides internes entrent en contact avec l'oxygène, ce qui permet aux bactéries aérobies (comme les *Bacillaceae* et les *Pseudomonaceae*) provenant de l'air et du sol de coloniser le corps. Parce que ces bactéries ne peuvent pas recourir à la fermentation, elles utilisent la voie ED pour produire de l'énergie, conduisant à la production de produits métaboliques à partir de la dégradation du pyruvate (Boumba, Ziavrou et Vougiouklakis 2008; Paczkowski et Schütz 2011).

3.4.4 Décomposition des os

Les os se décomposent au fil du temps par rupture physique, décalcification et dissolution dues à un sol ou à une eau acide. Il s'agit de processus longs, s'étendant sur des dizaines ou des centaines d'années.

Le Tableau 1 ci-dessous résume l'ensemble des produits de dégradation d'un cadavre.

Tableau 1 : Récapitulatif des produits de dégradations (en fonction des matières premières)

Type de produits de dégradation	Matières premières	Exemples
Composés Organiques Volatils	Lipides, sucres, protéines	Cétones, aldéhydes, acides carboxyliques, composés soufrés et aminés, alcanes, alcènes... Profils des COVs dynamique +/- 800 COVs
Azote	Protéines	Ammoniac
Energie	Hydrate de carbone, lipides	ATP, pyruvate
Acides organiques et alcools	Hydrate de carbone, lipides	Acide acétique, acide butanoïque, éthanol, butan-1-ol, etc.
Adipocire	Lipides	Acides carboxyliques et esters d'acides

3.5 Facteurs influençant la décomposition des cadavres

3.5.1 Les facteurs exogènes

Les insectes et les charognards sont les principaux responsables de la décomposition des cadavres à l'air libre. Lorsque les cadavres sont enterrés (> 1 m), ces espèces ne peuvent plus y accéder (la colonisation par les insectes est stoppée dès quelques dizaines de centimètres de profondeur), ce qui modifie le processus de décomposition et augmente significativement sa durée.

En conditions d'enfouissement, et particulièrement en pleine terre, la quantité d'oxygène disponible est limitée. Plus les cadavres sont compactés et enterrés profondément, moins il y a d'oxygène disponible. De plus, les gaz de décomposition entrent alors en compétition pour l'espace avec l'oxygène. Plus généralement, la profondeur d'enfouissement ainsi que la température du sol déterminent la vitesse de décomposition (Rodriguez et Bass 1985).

Durant les phases précoces de décomposition, les températures négatives (congélation, < - 20°C) modifient les équilibres bactériens, et une modification dans la succession de colonisation par les insectes est observée. Au niveau cellulaire, la congélation provoque un éclatement des membranes, perturbant ainsi le processus d'autolyse (Bugajski, Seddon et Williams 2011; Pechal *et al.* 2018; Roberts et Dabbs 2015).

Les facteurs anthropogéniques peuvent également impacter les processus de décomposition. La présence de certaines substances chimiques (stupéfiant, euthanasiant) a un impact sur le développement des insectes nécrophages. En effet, chez l'être humain, la présence de cocaïne dans les tissus morts engendre l'accélération du cycle de développement de certains diptères. Le temps de pupaison a quant à lui tendance à s'allonger (Goff, 1989). La présence de pentobarbital aurait tendance à accélérer la décomposition. Il a été observé que le stade de décomposition active est légèrement accéléré sur des porcs mis à mort à l'aide de cet euthanasiant. Ceci peut être expliqué par le fait que le cycle de développement des larves est accéléré. Il apparaît néanmoins que la colonisation par l'entomofaune du corps ne semble pas être affectée par la présence d'euthanasiant ou stupéfiant (Mémoire de fin d'études Rudy Caparros). Certaines études de cas ont également montré que les corps retrouvés dans des champs de culture traités par des produits phytopharmaceutiques à action insecticide ne sont pratiquement pas colonisés par des insectes nécrophages, ce qui a pour effet de ralentir la dégradation du corps (Dekeirsschieter *et al.* 2009).

Les substances chimiques retrouvées sur le corps ou dans les tissus du corps ne sont pas les seuls facteurs anthropogéniques impactant la décomposition. En effet, il a été montré que le degré d'anthropisation du milieu a un impact sur la dynamique de décomposition. On observe des différences de composés volatils cadavériques émis par des porcs se décomposant en milieu urbain comparé à des porcs se décomposant en milieu rural ou sauvage. Ceci peut être expliqué par la présence ou l'absence de certains microorganismes décomposeurs car les trois biotopes étudiés sont probablement très différents en termes de microbiote.

Enfin, la chaux, souvent utilisée dans but d'accélérer la décomposition des cadavres enfouis, peut en fait avoir l'effet inverse, en perturbant les communautés microbiennes impliquées dans cette décomposition (voir partie 4.3).

3.5.2 Facteurs endogènes

Tous les cadavres ne se décomposent pas de façon identique. La présence de lésions (fragmentation des cadavres) et d'affections *ante mortem* (charge bactérienne élevée) sont corrélées à une décomposition plus rapide (Bachmann et Simmons 2010; Dent, Forbes et Stuart 2004; Whittington 2019).

La décomposition peut être accélérée en cas de mortalité liée à un processus infectieux du fait de la charge bactérienne élevée *ante mortem* et la préexistence de bactéries dans le sang et les organes. Comme les bactéries diffusent plus facilement dans les fluides, une exsanguination ou une déshydratation peut retarder la putréfaction. Des hémorragies massives provoquent par ailleurs une déficience en hémoglobine et autres protéines issues des érythrocytes qui sont des sources considérables de nutriments pour les bactéries responsables de la putréfaction (C. Zhou et Byard 2011).

Certains agents infectieux (notamment *Clostridium* ou *Bacillus*) pourraient accélérer, par le biais d'exonucléases, le processus de décomposition des cadavres. Le GT ne dispose cependant pas de références bibliographiques concernant l'impact d'un agent infectieux donné sur le processus de décomposition des cadavres. En dehors des facteurs précédemment indiqués, le GT considère donc qu'il est peu probable que la présence d'un agent infectieux particulier ait un impact significatif sur le processus de décomposition sur le long terme du fait des processus de compétition qui entreraient en jeu entre cet agent et la flore environnementale, n'entraînant vraisemblablement pas de modifications de dégradation du cadavre.

En fonction des espèces, la décomposition des cadavres n'est pas identique. Outre la masse initiale et le rapport poids/surface, les différences tiennent principalement à la présence de phanères (poils ou plumes), au microbiote intestinal (e.g. différent entre un ruminant et un omnivore) et à la concentration en eau des tissus

Dans l'étude de Pratt, les lixiviats issus de cadavres de volaille, porc et bovin ont été analysés. La plus forte concentration d'azote a été trouvée dans les lixiviats de bovins et la plus faible dans ceux des volailles. En revanche, ce résultat est inversé si l'on considère la teneur en chlore (Pratt 2009).

Comme précédemment indiqué dans le paragraphe 3.4.1, un enrichissement en azote dans le sol est généralement observé lors de la décomposition d'un cadavre (Fancher *et al.* 2017). Ceci peut être expliqué par le fait que la concentration tissulaire en azote est de 32 g/kg pour un cadavre adulte humain et de 19 g/kg pour un nouveau-né. La concentration rapportée chez des espèces comme le porc, le rat et le lapin serait respectivement de 26, 32, et 29 g/kg, respectivement (Dubois *et al.* 2018).

Plusieurs centaines de COVs sont émis lors de la décomposition d'un corps. Deux études ont cherché à identifier à partir de ces COVs un profil de décomposition en fonction de l'espèce (humain, mammifères, oiseaux, reptiles, poissons, amphibiens). Huit COVs semblent être spécifiques à l'espèce humaine et porcine (Rosier *et al.* 2015, 2016).

Les compositions en lipides, protéines, etc. étant variables en fonction des espèces et des stades de développement, le processus de décomposition sera vraisemblablement différent en termes de cinétique, d'évolution microbiologique et de produits générés. Néanmoins, le peu d'études disponibles ne permet pas de dégager d'éléments précis. En outre, les études sont

difficilement comparables du fait de l'impact des conditions environnementales sur les expérimentations menées.

L'impact de la taille ou de la masse individuelle des cadavres sur le taux de décomposition a été étudiée par un certain nombre d'équipes, avec des effets parfois contradictoires observés, certains auteurs indiquant que les cadavres de petite taille étaient décomposés plus rapidement tandis que d'autres démontrent l'inverse. Dans une revue publiée en 2010, les auteurs ont indiqué que lorsque l'accès aux cadavres par les insectes était permis, alors la décomposition était plus rapide chez les petits cadavres (lapins) que chez les cadavres de taille moyenne (porcs) ou élevée (humains) (Simmons *et al.* 2010). Si les cadavres ne peuvent être colonisés par les insectes, en revanche, aucune différence n'est observée. L'impact de la taille individuelle n'est donc pas clair, sans doute du fait des interrelations existantes avec d'autres facteurs.

Les retours d'expérience sur des enfouissements de masse indiquent que les délais de gestion et de suivi des sites utilisés sont de l'ordre de plusieurs années (Consortium 2004). Ainsi, le plus grand site d'enfouissement utilisé lors de la crise de la fièvre aphteuse en 2001 au Royaume-Uni (Great Orton, Cumbria), qui a accueilli plusieurs centaines de milliers d'animaux (plus de 450 000 petits ruminants et de 10 000 bovins) a nécessité un suivi qui a été estimé à une vingtaine d'années ((Consortium 2004). L'accumulation d'un nombre élevé de cadavres enfouis en profondeur semble induire des conditions défavorables à la décomposition, et augmenterait le temps nécessaire à son achèvement mais il est difficile de préciser l'impact du seul paramètre quantité de cadavres car l'accumulation de ceux-ci modifie les facteurs exogènes : la disponibilité en oxygène sera limitée par le tassement par exemple.

Il est à noter que les facteurs endogènes apparaissent négligeables au regard des facteurs exogènes que sont : 1/ la température, 2/ l'accessibilité aux insectes et 3/ la disponibilité en oxygène (Simmons *et al.* 2010).

3.6 Evolution de l'environnement et devenir des agents infectieux à enjeux sanitaires

3.6.1 Evolution de l'environnement

Dans les écosystèmes terrestres, la majorité de la matière organique en décomposition provient soit des plantes, soit de matières fécales, les cadavres n'y contribuant que de façon marginale (e.g. 1 %, (Carter, Yellowlees et Tibbett 2007)). Néanmoins, même si la décomposition des cadavres contribue quantitativement faiblement au cycle des nutriments dans l'écosystème, elle peut avoir localement un impact significatif, bien que temporaire, sur l'environnement du sol (Barton *et al.* 2019).

Carter introduit le concept d'îlot de décomposition cadavérique (*cadaver decomposition island* - IDC) qui décrit à la fois les évolutions environnementales de l'environnement proche du cadavre mais également les interactions avec l'écosystème élargi (Figure 8).

A petite échelle (cadavre isolé), les produits de dégradation des cadavres sont rapidement assimilés par les communautés faunistiques et floristiques souterraines du sol associées au

cadavre (notion de *gravesoil*). Il en résulte la formation d'un îlot de fertilité très concentré (l'IDC). Cet îlot est associé à une augmentation de la biomasse et de l'activité microbiennes et de l'abondance en nématodes. Chaque IDC est une perturbation naturelle et éphémère, qui génère de l'énergie et des nutriments au sein de l'écosystème mais en reçoit également sous la forme d'insectes morts, de mues, de pupes (cocons) et matières fécales (issues des macro-nécrophages, des herbivores qui consomment la flore attractive et les prédateurs de ces herbivores) et des plumes (issues d'oiseaux nécrophages ou prédateurs). Les IDC contribuent donc à la fois à l'hétérogénéité du paysage, à la biodiversification des écosystèmes terrestres puisqu'ils sont des habitats spécifiques pour de nombreuses espèces de mouches, coléoptères, et espèces végétales pionnières.

A titre d'exemple, l'IDC associée à la décomposition d'un cochon d'Inde (*Cavia porcellus* L.) de 620 g s'étend 14 cm sous le cadavre dans un sol sablonneux (Bornemissza 1957).

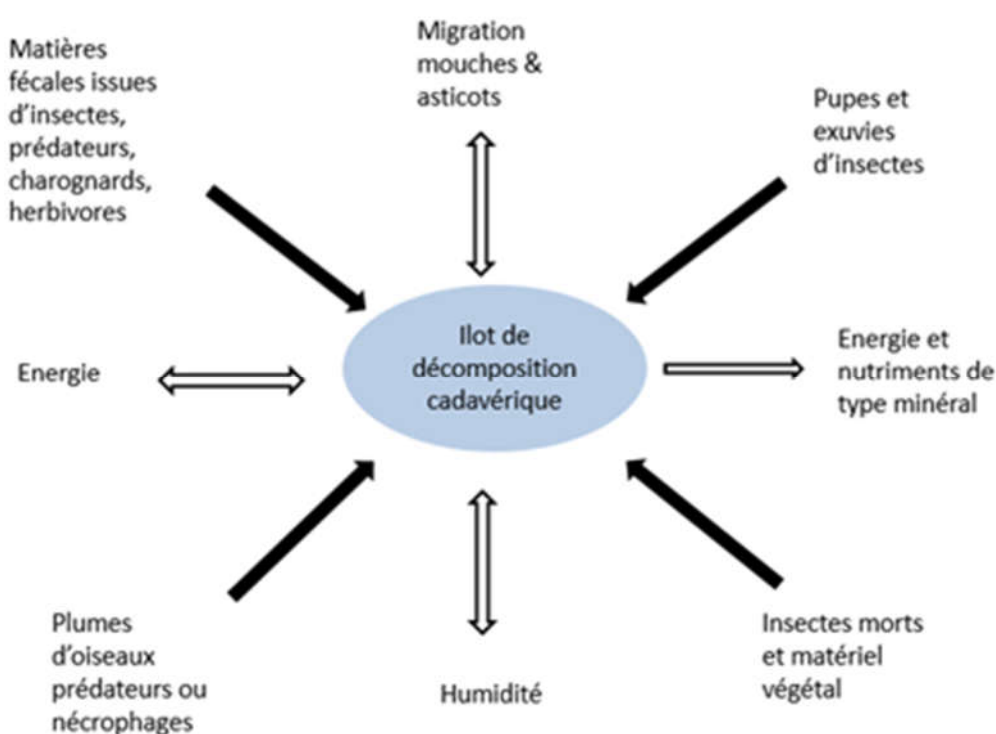


Figure 8 : Îlot de décomposition cadavérique (d'après (Carter, Yellowlees et Tibbett 2007))

3.6.1.1 Evolution des nutriments et des caractéristiques du sol

Les études s'intéressant aux changements chimiques de sol dans lesquels des corps se décomposent mettent généralement en évidence des changements de pH et de concentration en nutriments (azote, carbone organique, calcium et magnésium). Un enrichissement en azote dans le sol est généralement observé lors de la décomposition d'un cadavre (voir partie 3.4). Cet azote est issu des acides nucléiques, des acides aminés, des protéines mais aussi des sucres (Aitkenhead-Peterson *et al.* 2012; Benninger, Carter et Forbes 2008). Des variations de pH sont également souvent observées. Néanmoins aucune tendance durable n'a pu être mise en évidence en termes d'augmentation ou de diminution du pH. Cela est probablement dû au fait que les changements de pH sont étroitement liés au pH initial du sol ainsi qu'à la

présence de certaines substances dans le sol pouvant agir comme des tampons naturels. L'augmentation du pH est probablement liée à l'accumulation d'ions ammonium (NH_4^+). Pendant et après la libération des fluides cadavériques, le sol associé aux cadavres deviendrait de plus en plus anoxique ce qui expliquerait l'absence de nitrification¹⁷ des ions ammonium. La diminution du pH est quant à elle probablement liée à la diminution des ions ammonium et l'augmentation des nitrates (NO_3^-) (Szelez et al. 2018).

Dans une autre étude, la concentration en calcium et le pH étaient plus élevés à proximité directe du cadavre et diminuaient à mesure qu'on se rapprochait de la périphérie du site de décomposition. Cet effet était détectable pendant plusieurs années (Benninger, Carter et Forbes 2008; Melis et al. 2007).

3.6.1.2 Evolution des écosystèmes

Des études menées sur différents milieux ont montré que les cadavres de grands herbivores pouvaient avoir un effet important sur le sol et la végétation avoisinants, détectable pendant plusieurs années. L'impact de cadavres de grands herbivores sur les sols et les concentrations en éléments nutritifs des plantes sont toutefois moins facilement détectables en forêt tempérée que dans les habitats homogènes. Ceci peut être dû à la forte activité des nécrophages et au cycle des nutriments (Melis et al. 2007).

La décomposition des cadavres a également une influence non négligeable sur la croissance des végétaux, certaines plantes préférant un lieu riche en matière organique. Une plus grande quantité de nitrates est notamment présente dans les sols contenant des cadavres en décomposition (Aitkenhead-Peterson et al. 2012).

Les changements de caractéristiques de la végétation suite à l'enfouissement de cadavres peuvent être de différentes natures : différence de composition spécifique, de taille, de couleur, de phénologie (e.g. période de floraison). Ces anomalies résultent en général de la recolonisation de la végétation après une perturbation du sol. La recolonisation après perturbation est en général dominée par des plantes rudérales¹⁸ pionnières, incluant des graminées et plantes herbacées annuelles, qui apparaissent bien visibles quand elles sont comparées à l'environnement plus large, non perturbé.

D'un point de vue conceptuel, un site d'enfouissement représente un habitat nouveau dans lequel la végétation se développe de manière différente par rapport à la végétation de l'environnement élargi. La croissance des plantes peut être accélérée ou inhibée, en fonction de la profondeur de l'enfouissement (accessibilité des nutriments par les racines par exemple), des propriétés du sol, des caractéristiques de la végétation, du climat. Les expérimentations sur le sujet suggèrent que les changements seraient subtils mais pourraient persister dans le temps. Certains contextes géographiques peuvent néanmoins résulter en des changements plus visibles. En Australie par exemple, certaines plantes natives sont bien adaptées à des sols pauvres. Un afflux de nutriments en provenance de cadavres en décomposition peut modifier la communauté de plantes au niveau de l'emplacement de la fosse, envahie par des plantes exotiques ou annuelles.

La persistance des anomalies de végétation est rarement rapportée, néanmoins des différences de végétation de plus de deux ans et même au-delà de cinq ans ont été observées

¹⁷ Processus biologique par lequel les nitrates sont produits dans l'environnement.

¹⁸ Plantes rudérales : espèces végétales qui poussent spontanément dans un espace anthropisé, comme les décombres ou à proximité des maisons.

entre des sites contrôles et perturbés. Malgré un rythme de revégétalisation généralement lent, certaines situations encouragent la régénération de la végétation (e.g. présence de cadavres momifiés) (Watson *et al.* 2021).

Le Tableau 2 ci-dessous résume les modifications chimiques et biologiques du sol associées à la présence de cadavres en décomposition.

Tableau 2 : Résumé des modifications biologiques et chimiques des sols associés aux cadavres au cours de la décomposition (O Carter 2017)

Etat du cadavre	Frais	Putréfaction	Putréfaction avancée	Dessiccation progressive	Squelettisation
Biologie du sol associé au cadavre	Perturbation initiale Augmentation activité microbienne Modification de la structure de la communauté bactérienne et fongique	Augmentation activité microbienne Modification de la structure de la communauté bactérienne	Augmentation activité microbienne, biomasse Modification de la structure de la communauté bactérienne	Diminution de l'activité microbienne, biomasse Phase fongique post putréfaction Modification de la structure de la communauté bactérienne	Augmentation activité microbienne, biomasse Succession fongique (phase précoce à tardive) Modification de la structure de la communauté bactérienne
Chimie du sol associé au cadavre	Perturbation initiale Augmentation ammonium, dioxyde de carbone, nitrate, phosphate	Augmentation ammonium, acide butyrique, calcium, chlorure, magnésium, azote réactif à la nihydrine, nitrate, potassium, phosphates, acide propionique, sodium, sulfate, acide valérique Augmentation du pH	Voir putréfaction Augmentation phosphore, lipide, activité protéase, activité phosphodiesterase, azote total, phosphore total	Voir putréfaction Augmentation ammonium, conductivité électrique, azote réactif à la nihydrine, phosphore lipidique, azote total, phosphore total	Augmentation des acides aminés, azote réactif à la nihydrine, azote total, phosphore total, Diminution du pH

3.6.2 Devenir des agents infectieux à enjeux sanitaires

Les agents infectieux à enjeu sanitaire sont des agents responsables de maladies graves chez les animaux (sur le plan clinique ou sur le plan économique) et/ou responsable de zoonoses parmi lesquelles sont distingués :

- des agents infectieux de maladies soumises à PNISU (qui correspondent aux maladies de catégorie A dans le contexte de la mise en application de la Loi de Santé Animale¹⁹) comme par exemple les pestes aviaires (influenza aviaire, maladie de Newcastle), la fièvre aphteuse, la peste équine, ou encore la peste des petits ruminants,
- des agents de zoonoses : par exemple *Clostridium botulinum*, *Bacillus anthracis*, *Mycobacterium bovis*, *Francisella tularensis*, certaines espèces de *Brucella*, de *Burkholderia*, certains *E. coli* pathogènes, *Salmonella* agents de toxi infection alimentaire collective (TIAC), etc.

Le devenir des agents infectieux à enjeu sanitaire présents dans un cadavre dépend de la nature de l'agent et des conditions physiques et microbiologiques du milieu dans lequel ils se trouvent.

Les virus peuvent être classés en deux groupes selon leur structure. Cette dernière conditionne en partie leur survie dans l'environnement : les virus munis d'une enveloppe lipidique sont généralement moins résistants que les virus nus. De même, les bactéries capables de sporuler (*Bacillus*, *Clostridium*) sont nettement plus persistantes dans l'environnement que celles ne disposant pas de cette forme de survie. *B. spphaericus* a pu redonner une forme végétative à partir de spores conservées dans un insecte vieux de 20 à 45 millions d'années (Cano et Borucki 1995). Néanmoins dans le cas des bactéries non sporulées, la survie peut être prolongée si leur environnement leur permet de se multiplier. Par exemple *E. coli* et *Salmonella* se multiplient dans des fèces enterrées pendant les deux premières semaines suivant l'enfouissement (Temple, Camper et McFeters 1980).

Le devenir des agents infectieux est aussi conditionné par les conditions physiques du milieu. La résistance au pH est variable selon les germes. Certains virus sont résistants à un pH de 3, d'autres comme le virus de la fièvre aphteuse sont inactivés par des pH inférieurs à 7 et supérieurs à 11. Les bactéries sont sensibles aux pH acides (excepté *Helicobacter*) et la présence d'oxygène dans l'environnement est néfaste aux bactéries anaérobies strictes. De plus, la survie des agents infectieux est inversement proportionnelle à l'élévation de température.

Enfin le devenir des agents infectieux est dépendant de leur environnement microbiologique.

A la suite de la mort, la taille des populations d'agents pathogènes présents éventuellement dans un cadavre peut rester stable, diminuer ou croître. Les virus et les protozoaires diminuent ou restent stables en nombre, mais les bactéries peuvent se multiplier si elles se trouvent dans un environnement favorable riche en nutriments, et confrontées à un minimum de concurrence avec d'autres microorganismes. Seules les bactéries sporulées (i.e. *Bacillus anthracis*) et les prions font généralement exception à cette évolution.

¹⁹ Règlement (UE) 2016/429 du Parlement Européen et du Conseil du 9 mars 2016 relatif aux maladies animales transmissibles et modifiant et abrogeant certains actes dans le domaine de la santé animale (« législation sur la santé animale ») <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32016R0429> lien consulté le 7 juin 2021.

Les prions sont en effet très résistants aux moyens physiques et chimiques capables d'inactiver les agents pathogènes. Pour cette raison, il est supposé que seule l'incinération (avec respect de couples pression température précis) permet de les inactiver. A titre d'exemple, le compostage, qui permet l'élimination de la majorité des agents pathogènes, est inefficace pour réduire l'infectiosité des cadavres infectés par des prions (K. G. Wilkinson 2007). Néanmoins, certains auteurs ont démontré que des protéases microbiennes du sol, synthétisées en réponse à un approvisionnement en matière organique animale (issue du cadavre), ont pu dégrader la protéine prion *in vitro*. Cependant, le nombre de microorganismes susceptibles de produire des protéases actives sur le prion semble peu important (six sur 700 souches testées *in vitro*) et dans cette étude, il n'y a pas d'information sur la fréquence de ces souches dans les conditions de terrain (Rapp *et al.* 2006).

3.6.2.1 Interaction entre les virus pathogènes et les bactéries du nécrobiome

Les virus ne peuvent pas se multiplier dans un cadavre, tout du moins à partir du moment où il n'y a plus de cellules vivantes susceptibles de servir de support à cette multiplication. De ce fait, la compétition entre virus et nécrobiome se résume à une inactivation des virus par des facteurs physique (par exemple la température) ou chimique (par exemple le pH) générés par la flore vivante microbiologique de l'environnement des virus. Par ailleurs, les temps de survie des virus infectieux (dont le virus de la PPA) dans les différents milieux dépendraient des enzymes (protéases, lipases et DNase), lesquelles peuvent varier en fonction des bactéries présentes (Anses 2018a).

Une étude montre que la survie / l'infectiosité de certains virus infectant le porc (virus de la PPC, virus Influenza porcin) ou les bovins (virus de la diarrhée virale des bovins) est moindre dans un lisier (conditions anaérobies) que dans un milieu de culture (Eagle's Minimum Essential Medium, EMEM), démontrant l'intervention de la matière organique dans l'inactivation (Bøtner et Belsham 2012). Pour d'autres virus comme le virus de la fièvre aphteuse ou le parvovirus porcin, la survie est la même dans les deux conditions. Par ailleurs, cette survie décroît en fonction de l'augmentation de la température. Néanmoins, en dépit de la putréfaction, le virus de la PPA peut persister pendant de longues périodes dans certains tissus comme la moelle osseuse (Penrith et Vosloo 2009). Cette survie a été aussi constatée pour le virus de la fièvre aphteuse qui reste viable jusqu'à sept mois dans la moelle osseuse stockée entre 1 et 4°C (Stenfeldt *et al.* 2016). L'EFSA rapporte d'après Kovalenko *et al.* que le virus de la PPA resterait viable dans des cadavres de sangliers contaminés expérimentalement par du sang infecté, pendant 81 jours (en été-automne) après enfouissement dans le sol à une profondeur de 12 cm, et pendant 192 jours lorsqu'ils ont été laissés à la surface du sol (EFSA 2014). Une étude récente de Zani (2020) dans laquelle des carcasses de sangliers atteints de PPA ont été déterrées et analysées (moelle osseuse, divers tissus ainsi que des échantillons du sol) montre que sur 17 des 20 carcasses analysées, du génome viral a pu être retrouvé mais sans isolement viral possible. De plus, sur sept échantillons de sol, du génome viral a également pu être retrouvé. Les auteurs indiquent que l'augmentation de température pendant le processus de décomposition pourrait être à l'origine de l'inactivation du virus (Zani *et al.* 2020).

Certains auteurs suggèrent que le virus de la fièvre aphteuse, qui n'a pu être détecté dans aucun échantillon tout au long de la période d'étude portant sur des cadavres de porcs enfouis lors de la panzootie de 1997 à Taiwan, avait pu être inactivé par la chaleur et l'acidité provenant des processus de production d'acides organiques lors des conditions anaérobies dans les fosses où ont été enterrés les cadavres (Hseu et Chen 2017).

Par ailleurs, la digestion anaérobie (rencontrée dans les dernières étapes de la putréfaction) est à l'origine de l'augmentation de température qui participe à l'élimination de nombreux virus et bactéries pathogènes (Gwyther *et al.* 2011; A.P. Johnson, Mikac et Wallman 2013).

3.6.2.2 Interaction entre les bactéries pathogènes et les bactéries du nécrobiome

Les données concernant les interactions entre bactéries proviennent de l'exploration de la *colonization resistance* (résistance à la colonisation), notion émise au début des années 1980 et qui depuis a fait l'objet de nombreuses études. Elles concernent principalement les relations entre certaines bactéries du microbiote intestinal et des bactéries entéropathogènes (*Clostridioides difficile*, *Salmonella*, *Shigella*, *E. coli*), à l'exception de certaines espèces de bactéries sporulées (appartenant aux genres *Clostridium*, *Clostridioides*, etc.) pour lesquelles la possession d'une spore les rend résistantes à la plupart des effets de la résistance à la colonisation.

La résistance à la colonisation peut être issue d'une interaction directe entre bactéries (qui peut donc intervenir entre bactéries du nécrobiome et bactéries pathogènes).

Dans ce dernier cas, les interactions directes résultent soit de :

- a) la sécrétion de substances actives antibactériennes auxquelles certaines bactéries pathogènes sont sensibles (bactériocines, antibiotiques, acides organiques, etc.),
- b) soit de la consommation de substrats indispensables aux bactéries pathogènes pour survivre et/ou se développer (compétition pour un ou des nutriments, déplétion en oxygène, etc.)
- c) soit des modifications du milieu issues de cette consommation par le nécrobiome, rendant le milieu délétère pour les bactéries pathogènes (baisse ou hausse de pH, hausse de température, etc.) (K. G. Wilkinson 2007).

Enfin, la résistance à la colonisation peut s'appuyer sur des contacts entre bactéries avec intervention de système de sécrétion (TSS6²⁰ par exemple) (Jacobson *et al.* 2018; Sorbara et Pamer 2019). Cependant, ces interactions dynamiques entre bactéries commensales et pathogènes sont complexes et difficiles à cerner dans leur ensemble. Et, d'autre part, même si le nécrobiome est en partie issu du microbiote intestinal, le parallèle est sans doute imparfait.

Il a été démontré que le microbiote intestinal entre en compétition avec *Shigella flexnerii* pour les sources de carbone. En revanche, *Campylobacter jejuni* utilise des acides aminés et des vitamines qui lui sont propres et n'entre pas en compétition pour ces substrats avec le microbiote. Alors que *Salmonella* Typhimurium, *Listeria monocytogenes* et *Yersinia enterocolitica* entrent en compétition avec d'autres bactéries non méthanogènes (différentes des Archées) pour les hydrates de carbone (Salhström, 2003), les bactéries de l'ordre des

²⁰ Type 6 secretion system (système de sécrétion de type 6) : c'est un complexe formé de plus de 10 protéines différentes retrouvé chez les bactéries Gram négatif. Il permet à la bactérie de reconnaître et d'injecter des toxines dans ses cellules procaryotes ou eucaryotes.

Clostridiales entrent en compétition nutritionnelle avec *Listeria monocytogenes* ou développent un antagonisme avec cette bactérie (Chiu *et al.* 2017). La compétition pour des ions métalliques /traces de métal comme le zinc ou le fer est bien connue pour *Vibrio cholerae* et *Campylobacter jejuni* (Sorbara et Pamer 2019).

Les bactéries du genre *Bacteroides* produisent des propionates qui inhibent la croissance de *Salmonella* dans un modèle murin (Jacobson *et al.* 2018). Ces mêmes *Bacteroides* produisent des acides acétique et butyrique qui inhibent la croissance de *Salmonella* (Buffie et Pamer 2013). *Bacillus thetaiotaomicron* exclut *Corynebacterium rodentium* de la lumière intestinale en consommant les monosaccharides dont ce dernier a besoin pour se développer. *B. thetaiotaomicron* agit en synergie avec une autre bactérie, *B. longum*, soulignant la complexité des relations entre bactéries (Buffie et Pamer 2013). Les *Lactobacillus* produisent tout une série de bactériocines. Par exemple *L. lactis* produit de la nisine qui inhibe *Staphylococcus aureus* et *Listeria monocytogenes*. Les entérobactéries produisent des bactériocines (microcines) actives sur des bactéries de la même famille. Certaines bactéries (*Enterobactériaceae*, Bactéroïdales) synthétisent des protéines antimicrobiennes comme la colicine connue comme antibiotique actif sur les bactéries Gram négatif (Sorbara et Pamer 2019). De nombreuses espèces de *Bifidobacterium* produisent des substances antimicrobiennes qui induisent une résistance aux agents pathogènes digestifs. Ainsi la métabolisation par ces bactéries d'hydrates de carbone leur permet de synthétiser des peptides et acides organiques anti microbiens actifs en particulier contre *C. difficile*, *E. coli* entérohémorragiques et *C. rodentium* (Buffie et Pamer 2013). Les acides gras volatiles produits par certains genres bactériens lors de digestion anaérobie agissent sur la survie de bactéries pathogènes comme *Salmonella* et *E. coli* (Sahlström 2003). Les bacilles (du groupe des *Firmicutes*) sont capables de produire des substances antibactériennes qui inhibent le développement de bactéries entéropathogènes *in vitro*. *Bacillus thurengiensis* produit une bactériocine, la thuricin CD, agissant sur la membrane bactérienne et perturbant la croissance de *C. difficile* et de *L. monocytogenes in vitro* (Buffie et Pamer 2013). *Listeria monocytogenes* produit une bactériocine (Lmo2776) qui limite la croissance de *Prevotella* (Rolhion *et al.* 2019). *Pseudomonas aeruginosa* possède un système de sécrétion de type 6 lui permettant de détruire *Vibrio cholerae* (Buffie et Pamer 2013).

3.6.2.3 Effet des bactéries du nécrobiome sur les helminthes pathogènes

De nombreuses études *in vivo* ont montré une interaction entre les helminthes pathogènes et le microbiote intestinal de plusieurs mammifères dont le porc et les bovins. Lors d'une infestation par *Taenia suis*, les porcs présentent une réduction d'un certain nombre de genres bactériens dans le côlon, y compris *Ruminococcus* et *Fibrobacter*, qui sont impliqués dans le métabolisme des glucides. L'utilisation des hydrates de carbone par les bactéries du microbiote intestinal a un effet néfaste sur la survie du nématode *Oesophagostomum dentatum* chez le porc. Cet effet peut dériver du métabolisme des hydrates de carbone, modifiant le pH et favorisant la production d'acide lactique et d'acides gras à chaîne courte (SCFA) par des bactéries du microbiote. Ceci a été confirmé par la suite par des études montrant que l'infusion directe de SCFA dans le côlon des porcs infectés par *O. dentatum* a un effet antiparasitaire substantiel (Williams *et al.* 2021).

3.7 Synthèse sur la décomposition des cadavres

La Figure 9 ci-dessous résume les interactions au sein du nécrobiome, avec la nécromasse, l'habitat et l'écosystème.

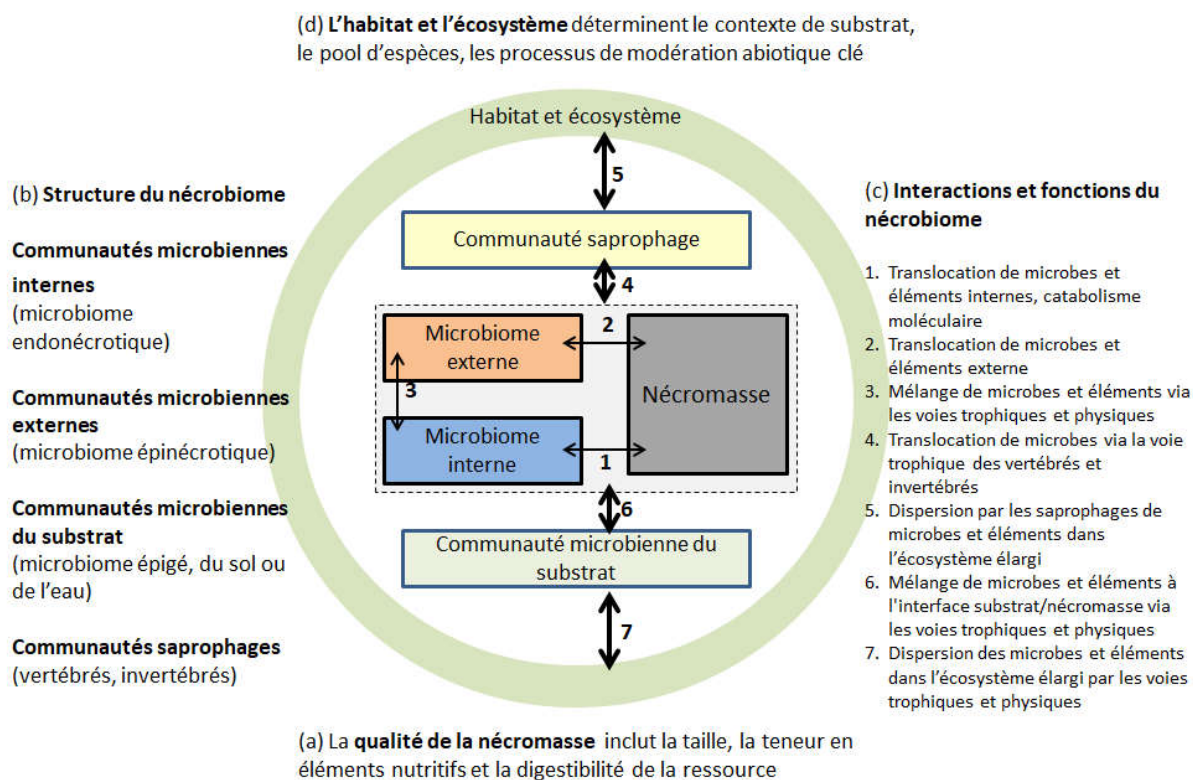


Figure 9: Interactions au sein du nécrobiome avec la nécromasse, l'écosystème et l'habitat (M. Eric Benbow et al. 2019)

Le nécrobiome est la communauté d'organismes associés à la décomposition de la nécromasse. Il inclut les interactions de ces organismes entre eux, avec la nécromasse, et avec l'habitat et écosystème environnants. Ce concept est commun aux plantes, champignons, déjections, cadavres d'animaux que ce soit en milieu terrestre ou aquatique.

(a) La variabilité de la qualité de la nécromasse a un effet important sur le nécrobiome associé.

(b) La nécromasse en décomposition est l'hôte, du vivant de l'animal (végétal), de microbiomes interne et externe. Ces communautés évoluent après la mort et tout au long de la décomposition. Ce microbiome en évolution, utilise la matière organique comme habitat, source d'énergie et de nutriments. Au fur et à mesure que progresse la décomposition, la matière organique et l'activité microbienne associée facilitent l'attraction d'invertébrés et vertébrés saprophages qui consomment la nécromasse et la communauté microbienne.

(c) Tous ces composants biotiques du nécrobiome interagissent de manière à générer des voies de dispersion pour les microbes et autres éléments dans le sol adjacent ou le compartiment aquatique, ainsi que dans l'écosystème avoisinant à différentes échelles spatiales.

(d) Le nécrobiome et ses fonctions opèrent comme un réseau d'interactions complexes, contraint par le contexte terrestre ou aquatique dans lequel il se trouve, le pool d'espèces présentes et les variations de facteurs abiotiques.

La plupart des études identifiées ayant été menées afin de répondre à des objectifs différents des questions de la saisine, les éléments de réponses quant au processus de décomposition des cadavres et l'impact de différents facteurs sur celui-ci restent donc parcellaires. Pour autant, certains éléments peuvent être soulignés.

La décomposition est un processus complexe, sur lequel de nombreux facteurs ont un impact, les principaux sont **les facteurs exogènes** :

- l'accessibilité des charognards ou des insectes au cadavre accélère le processus de décomposition,
- la température influence l'activité des microorganismes : dans une gamme de températures ambiantes conventionnelles (i.e. allant de -20°C à +50°C), des températures froides, notamment proches de 0°C ou négatives, ralentissent ou arrêtent les processus de décomposition tandis que la chaleur a tendance à les accélérer,
- la présence d'oxygène, de par son impact sur les microorganismes et les processus métaboliques impliqués, constitue un paramètre fondamental de la cinétique de décomposition. Ainsi, un environnement oxygéné favorise le taux de décomposition. Par ailleurs, de manière qualitative, les microorganismes et voies métaboliques étant différents selon la présence ou non d'oxygène, les produits de décomposition sont également différents.
- les pH extrêmes ont un impact négatif sur la survie et l'activité des agents microbiologiques impliqués dans la décomposition (à pH >10, l'impact sur les communautés microbiennes est très fort).

Les facteurs endogènes ont aussi un impact mais celui-ci est négligeable au regard des facteurs cités précédemment. Selon les observations de terrain, des petits cadavres se décomposent plus rapidement que ceux des grands animaux (dégradation rapide des cadavres de volailles ou de poissons par rapport aux cadavres de bovins).

Le nécrobiome évolue au cours du processus de décomposition. Les taxons se succèdent au cours du temps selon les nutriments disponibles, la nature du sol, l'environnement du cadavre (eau, terre, etc.) ou d'autres paramètres physico-chimiques (humidité, température, pH). Les changements dans la composition de la communauté microbienne varient selon les études, dont les résultats semblent parfois contradictoires. Il ressort néanmoins que les groupes bactériens qui prédominent sont les *Proteobacteria* qui précèdent les *Firmicutes*. Les **agents pathogènes** ne peuvent en général plus se multiplier dans les cadavres et, à l'exception de certains agents présentant des formes de résistance dans le milieu extérieur particulièrement élevée (spores, protéines prions), pour les autres, leur quantité diminue au cours du temps du fait de phénomènes de compétition, de la modification du milieu ou encore de la synthèse de substances néfastes pour leur survie par le nécrobiome. La décomposition d'un cadavre est une perturbation naturelle et éphémère, qui génère de l'énergie, des nutriments et des échanges d'énergie au sein de l'écosystème élargi. Elle a donc un impact sur l'environnement en contribuant à la fois à l'hétérogénéité du paysage, à la biodiversification des écosystèmes terrestres puisqu'ils sont des habitats spécifiques pour de nombreuses espèces de mouches, coléoptères, et espèces végétales pionnières.

Pour conclure, tous ces facteurs interagissent entre eux et il est difficile de mesurer l'impact d'un facteur indépendamment des autres. Il ressort cependant que le fait d'enfouir un cadavre va rapidement le soustraire à certains facteurs favorisant la décomposition (charognards, insectes, oxygène), ce qui aboutit à un ralentissement du processus de décomposition ainsi qu'à une modification des voies métaboliques empruntées. Dans certaines conditions d'enfouissement avec de faibles niveaux d'oxygène, un arrêt du processus de décomposition peut être observé et, si l'humidité est suffisante, la formation d'adipocire.

4 Description et analyse des modalités de gestion des cadavres en cas de circonstances exceptionnelles, contraintes et risques associés

Les cadavres d'animaux d'élevage sont collectés par l'équarrisseur dans un délai de deux jours après l'appel de l'éleveur, qui lui-même doit prévenir l'établissement chargé de l'enlèvement dans les 48 h après la mort de l'animal (Article L226-6 du CRPM) (voir partie 2). Ces délais peuvent être allongés lorsque les cadavres peuvent être stockés sous couvert du froid, jusqu'à deux mois en cas de stockage sous froid négatif (Article R226-13 du CRPM).

En cas de circonstances exceptionnelles entraînant une accumulation de cadavres sur un site, par surmortalité pour cause infectieuse (comme l'Influenza aviaire), pour cause non infectieuse (canicule), ou en cas d'impossibilité de passage de l'équarrisseur ou de traitement à l'usine : comment gérer les cadavres en tenant compte à la fois des contraintes techniques, des risques sanitaires et environnementaux ?

Ces cadavres peuvent être gérés temporairement sur le site d'élevage ou sur un terrain communal dédié, c'est-à-dire stockés temporairement sur le site avant d'être acheminés et éliminés dans les centres d'équarrissage ou en « CSDU », ou gérés de manière définitive, par enfouissement en profondeur (cadavres dans une fosse ou une tranchée), par compostage (processus biologique de décomposition dans un environnement aérobie), par recouvrement en surface (hybride entre l'enfouissement en profondeur et le compostage) ou par d'autres modalités de gestion.

Ces différentes méthodes doivent prendre en compte des contraintes à la fois techniques et environnementales, comme la géologie, la topographie et l'hydrogéologie des sites lors d'enfouissement, la maîtrise de paramètres physiques comme la température lors du compostage des cadavres et également la proximité des infrastructures environnantes comme les habitations ou les milieux naturels.

La gestion des cadavres sur site peut engendrer des risques sanitaires et environnementaux liés à la propagation d'agents pathogènes ou de nutriments chimiques lors de la décomposition des cadavres. Des microorganismes peuvent être présents dans le liquide corporel des cadavres en décomposition et atteindre les eaux souterraines et de surface. Quelques rares agents pathogènes peuvent survivre pendant de longues périodes dans les sols, notamment des spores de *Bacillus anthracis*, entraînant un risque de réintroduction de maladies. Les liquides corporels peuvent également contenir une quantité importante de nutriments chimiques, entraînant un excès d'azote et de phosphore dans le sol, l'eau et l'air avec un impact sur l'environnement et son écosystème. L'exposition des êtres humains et des animaux peut avoir lieu par la consommation d'eau, de plantes cultivées, ou par inhalation ou contact direct avec une zone de stockage de cadavres. Les nuisances pour le voisinage comme les odeurs ou la prolifération d'insectes sont également des éléments à prendre en compte dans les impacts sanitaires liés à la gestion des cadavres sur site.

Dans cette partie, sont recensées des pratiques qui ont été mises en œuvre en France ou dans d'autres pays pour gérer les mortalités de masse. Les informations proviennent à la fois d'articles scientifiques et de nombreux documents de retours d'expérience, guides de bonnes pratiques, etc.

4.1 Stockage temporaire sur le site de l'élevage avec élimination vers les centres d'équarrissage

4.1.1 Stockage en surface

En cas de mortalité, les éleveurs peuvent être amenés à déposer les cadavres au sol, à l'air libre, notamment quand il n'existe pas de systèmes de stockage hors sol (bac réfrigéré, chambre froide, etc. généralement adaptés aux espèces de petite taille : e.g. volaille, porcelet, poisson). C'est le cas en particulier pour les espèces de grande taille (e.g. bovin, truie/verrat). Ce mode de stockage peut générer des lixiviats, des aérosols, des nuisances olfactives ou liées aux insectes et les cadavres peuvent faire l'objet de nécrophagie.

Dans certaines études et guide de bonnes pratiques d'hygiène, il est recommandé de déposer les cadavres sur une dalle bétonnée et dans une enceinte fermée grillagée (protection sanitaire contre les nécrophages) (Chevillon 2005; IFIP 2009). Cette zone de stockage doit être la plus éloignée possible de l'élevage (Chevillon 2005).

Des cadavres animaux laissés ainsi peuvent être attractifs pour les insectes (Dubie *et al.* 2017), les charognards.

Certains éleveurs utilisent des cloches comme protection contre les nécrophages (peuvent être domestiques (chat, chien) ou sauvages) et pour réduire les odeurs, d'autres des bâches. Les équarrisseurs en déconseillent l'utilisation parce que bâches et cloches accélèrent la décomposition et nuisent donc au processus de l'équarrissage et recommandent plutôt le recouvrement par des végétaux qui ralentit la décomposition et gêne l'accès des animaux nécrophages aux cadavres (Audition F. Bellanger, O. Boulleveau et H. Fumery du 25 mai 2020).

Probst *et al.* ont conduit une étude en Allemagne visant à étudier le comportement de sangliers vis-à-vis de leurs congénères morts (Probst *et al.* 2019). Les contacts intraspécifiques consistent majoritairement à renifler et à pousser les cadavres. La nécrophagie intraspécifique n'a pas été mise en évidence. Des marcassins ont néanmoins été observés mâchouillant des os seulement lorsque la squelettisation était complète.

Par ailleurs, l'Office français de la biodiversité (OFB) a conduit des études sur le régime alimentaire des sangliers et analysé un grand nombre d'estomacs dans des conditions écologiques variées. Poils et viande ont rarement été détectés dans les estomacs de sanglier. La bibliographie, couplée aux résultats d'études des estomacs et l'observation sporadique par pièges vidéo des sangliers face à des cadavres, suggère que les sangliers s'alimenteraient rarement sur cadavres (toutes espèces) et seulement dans des conditions écologiques particulières, c'est-à-dire en cas de faible voire très faible disponibilité alimentaire. Leur régime alimentaire est plutôt opportuniste, et non carnivore (Eric Baubet, communication personnelle OFB).

Probst et al. montrent également que lors du suivi photographique des cadavres de sangliers, des carnivores, des oiseaux, des sangliers et d'autres espèces ont été observés sur le site respectivement sur 40 %, 33 %, 26 % et 1 % des photos interprétables (Probst *et al.* 2019). Vingt-trois espèces animales (y compris le chien) ont été observées sur le site. Trois espèces de mammifères et six espèces d'oiseaux se sont alimentées sur le cadavre à différents stades de décomposition. En hiver, les cadavres étaient visités plus fréquemment par les oiseaux, mais renards et chiens viverrins étaient responsables de la majorité de la consommation *post mortem*. En été, les cadavres étaient visités quasi-exclusivement par les mammifères et principalement par les chiens viverrins (78 % des photos avec mammifères). Il est néanmoins important de rappeler qu'à la saison chaude, une large partie des cadavres n'a pas été consommée par des mammifères ou oiseaux mais rapidement métabolisée par les larves d'insectes. A plusieurs occasions, les cadavres ont été visités par plusieurs espèces.

4.1.2 Par fermentation

La fermentation est un processus anaérobie qui peut se produire dans n'importe quel récipient fermé et non corrosif, à condition qu'il soit ventilé pour libérer le CO₂ produit (Blake et Donald 1992). Pour obtenir une fermentation plus uniforme et efficace des cadavres, ils doivent être broyés en cubes de 2,5 cm³ au maximum et être mélangés avec une source de glucides fermentescibles (lactose, glucose, saccharose, lactosérum, mélasse, ou maïs moulu) et inoculés avec une culture bactérienne (Erickson *et al.* 2004). Les sources de glucides et les cadavres hachés devraient être ajoutés dans un rapport pondéral de 1:5 (Erickson *et al.* 2004). La source de l'inoculant est généralement *Lactobacillus acidophilus*, une souche de bactérie qui produit de l'acide lactique à partir de la fermentation des sucres.

Ces conditions permettent une diminution du pH des tissus frais d'environ 6,5 à moins de 4,5 en 48 heures. La température du produit de fermentation doit être supérieure à 30°C pour obtenir un produit biologiquement stable avec un pH inférieur à 4,5 (Tamim et Doerr 2000).

Cette méthode nécessite des installations et équipements particuliers, dont la disponibilité en France est incertaine, ce qui semble difficilement compatible avec une situation d'urgence.

4.1.3 Par préservation acide

La préservation acide des cadavres par l'inclusion d'acides inorganiques tels que l'acide sulfurique (Malone 1988) ou l'acide phosphorique (T. F. Middleton et Ferket 2001; T. F. Middleton, Ferket et Boyd 2001) est efficace. Cependant, pour des raisons de sécurité liées à la manipulation de la solution mère d'acide sulfurique, l'utilisation d'acide phosphorique est généralement favorisée. Une préservation efficace implique le broyage des cadavres pour permettre une distribution uniforme de l'acide et nécessite une structure de stockage résistant à la corrosion capable de traiter la quantité souhaitée de cadavres avant la livraison à une installation d'équarrissage. Cette méthode nécessite des installations et équipements particuliers, dont la disponibilité en France est incertaine, ce qui semble également difficilement compatible avec une situation d'urgence.

4.1.4 Par réfrigération ou congélation

Bien que le refroidissement ou la congélation des cadavres a peu d'effet pour réduire les agents pathogènes, ces procédés peuvent être efficaces pour prolonger la durée de stockage tout en éliminant ou en minimisant le processus de décomposition.

Selon les filières de production, des moyens de stockage des cadavres peuvent être présents sur le site de l'exploitation. Ainsi, les élevages avicoles ou aquacoles détiennent fréquemment des chambres froides ou des congélateurs leur permettant de stocker les cadavres en attendant le passage de l'équarrisseur. Seul un stockage sous couvert du froid négatif permet de dépasser un délai de stockage de quatre jours. Les capacités de stockage sont cependant limitées : l'objectif est d'espacer le passage des camions d'équarrissage, or ces moyens permettent de stocker un nombre limité de cadavres. Il ne serait donc pas possible de stocker l'intégralité d'un lot de volailles ou de poissons en cas de mortalité élevée avec ces équipements présents en élevage. Lorsque les animaux sont de plus grande taille (bovins, certains types d'élevage porcins, etc.), un stockage temporaire est parfois réalisé sous cloche ou bâche. Encore une fois, seul un petit nombre de cadavres peut être géré de cette manière, et pour une durée limitée. L'équarrisseur est alors appelé pour intervenir à chaque événement de mortalité.

Il ne paraît pas opportun d'envisager de stocker des cadavres à l'air libre, ce mode de stockage pouvant générer des lixiviats, des aérosols (agents infectieux), des nuisances olfactives ou liées aux insectes et faire l'objet de nécrophagie. De plus, certains procédés (dispositions des cadavres sous bâches ou sous cloches) accélèrent la décomposition et nuisent donc au processus de l'équarrissage.

La fermentation, la conservation acide et la réfrigération ou la congélation des cadavres sont des procédés permettant de stocker et de stopper la décomposition des cadavres. Ces méthodes n'éliminent pas les cadavres, mais permettent un stockage à court terme avant leur prise en charge par l'équarrissage. Leur intérêt est discutable, dans la mesure où elles ne permettent de stocker que quelques centaines de kilos de cadavres à la fois et qu'elles nécessitent pour certaines des installations et équipements particuliers, dont la disponibilité est incertaine en France.

4.2 Enfouissement définitif en profondeur des cadavres sur site

Dans le cadre de la saisine, ce paragraphe décrit les méthodes d'enfouissement définitif pouvant être mises en œuvre sur le site de l'élevage ou sur un terrain dédié, mais hors « CSDU » (traité partie 2).

4.2.1 Définition

L'enfouissement définitif est une technique visant à placer des cadavres dans une fosse ou une tranchée (Baba *et al.* 2017; Freedman et Fleming 2003). Deux types d'enfouissement peuvent être identifiés hors « CSDU » : l'enfouissement à la ferme et l'enfouissement de masse sur un terrain communal dédié (Bertrand, Quemener et Robert 2006).

L'enfouissement sur le site de l'élevage consiste à placer les cadavres dans une fosse préalablement creusée et à les recouvrir avec la terre excavée. Ce mode d'enfouissement doit prendre en compte les caractéristiques du sol et du site : topographie, propriété hydrogéologique, proximité de l'eau (surface ou souterraine), lieux publics, accessibilité au site et l'utilisation future du site. Cette technique est possible lorsque la nappe phréatique est profonde et le type de sol imperméable (Bertrand, Quemener et Robert 2006) (Figure 10).

La législation liée à l'enfouissement de cadavres d'animaux est fixée par les articles L226-1 à L226-8 du CRPM. De manière générale, l'enfouissement de cadavres est interdit quel que soit leur poids. Il peut néanmoins être autorisé en cas d'urgence par arrêté municipal ou préfectoral ou encore par le ministre de l'agriculture en cas d'épizootie. Néanmoins, le choix du site d'enfouissement doit respecter certaines contraintes réglementaires : le site d'enfouissement doit être situé à une distance d'au moins 100 mètres des habitations environnantes et des cours d'eau (article R223-5 du CRPM). Le site doit également être entouré d'une clôture pour en empêcher l'accès. De plus, il est à noter que les végétaux de ce terrain ne pourront pas être utilisés pour le fourrage, et qu'ils devront être coupés et brûlés sur place. Il n'existe néanmoins pas de réglementation concernant les pratiques d'enfouissement (Bertrand, Quemener et Robert 2006).

Certains départements ont donc mis en place un cahier des charges permettant de réaliser des enfouissements tout en garantissant la sécurité sanitaire (Chabart, Chevrier et Blanc 2010; DGAL 2019). Ces cahiers des charges prennent en compte deux critères dans la détermination des zones d'enfouissement, à savoir le contexte naturel et l'environnement du site. Ces deux critères permettent de classer les zones géographiques en trois catégories : enfouissement possible (zone 1), enfouissement possible si une étude préalable est effectuée (zone 2), enfouissement impossible (zone 3). Il est néanmoins demandé de faire appel à un hydrogéologue avant de définir précisément le site d'enfouissement (Bertrand, Quemener et Robert 2006). Les différents critères seront détaillés dans les points suivants.

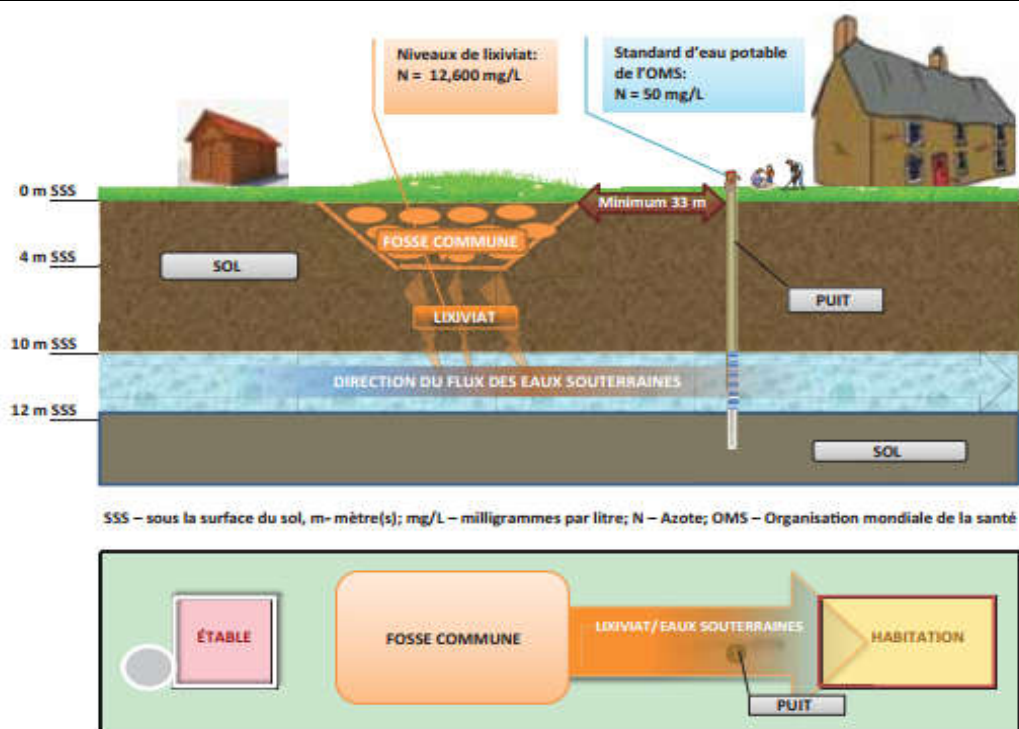


Figure 10 : Enfouissement définitif en profondeur (source FAO, 2018)

4.2.2 Modalités et contraintes

4.2.2.1 Géologie et pédologie

La prise en considération de la géologie et la pédologie des terrains envisagés pour l'enfouissement de cadavres a pour but d'éviter les contaminations des aquifères situés sous la fosse (Antea 2010; Bertrand, Quemener et Robert 2006; Fédération Nationale des Chasseurs 2019; L. Miller et Flory 2018). Cette contamination est fonction dans un premier temps du type de sol accueillant la fosse. En France, la recommandation en vigueur est de sélectionner les terrains les moins perméables (limono-argileux ou loessiques avec une hydromorphie²¹ faible et un aspect non caillouteux). Au Canada, il est recommandé d'éviter les sols grossiers entraînant un drainage trop important des produits de la décomposition au sein de la fosse avec peu de filtration (Bertrand, Quemener et Robert 2006; Chabart, Chevrier et Blanc 2010). Ce sol doit préférablement reposer sur un substrat argileux (Bertrand, Quemener et Robert 2006).

En plus de la perméabilité du sol, il est nécessaire d'identifier la présence éventuelle de fractures, failles et discontinuités géologiques qui pourraient permettre la propagation des polluants issus de la fosse (Bertrand, Quemener et Robert 2006).

Bien évidemment, il sera important de choisir le site d'enfouissement sur une formation géologique et pédologique favorable mais permettant que le sol soit creusé (Chabart, Chevrier et Blanc 2010; DGAL 2019).

²¹ L'hydromorphie est la saturation des pores d'un sol en eau sur une période plus ou moins longue de l'année, <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-hydromorphie-6258/>, lien consulté le 30 avril 2021.

4.2.2.2 Hydrogéologie

La profondeur de la nappe phréatique sous la fosse est un paramètre important à considérer, toujours dans l'objectif d'éviter les contaminations des eaux souterraines (Antea 2010; Bertrand, Quemener et Robert 2006; Fédération Nationale des Chasseurs 2019; L. Miller et Flory 2018). Il est recommandé que la nappe phréatique se situe à quatre mètres de profondeur au minimum (Bertrand, Quemener et Robert 2006). La profondeur de la nappe variant au cours du temps, il faut considérer le point le plus haut enregistré en période de crue. En effet, en période de hautes eaux, la nappe ne doit pas atteindre la fosse. Il est recommandé que les fosses soient placées un mètre plus haut que le plus haut niveau de la nappe enregistré au cours des variations saisonnières²² (Bertrand, Quemener et Robert 2006; DGAL 2019).

Outre la profondeur de la nappe phréatique, la présence d'un milieu karstique²³ sera aussi à considérer lors du choix du site d'enfouissement (Bertrand, Quemener et Robert 2006; Chabart, Chevrier et Blanc 2010; Fédération Nationale des Chasseurs 2019; L. Miller et Flory 2018). En effet, le réseau d'aquifères, établi dans des roches carbonatées, constitue un réservoir important d'eau souterraine qui émerge à la surface en sources souvent importantes et permet une diffusion importante des polluants et doit donc être évité lors du choix du site d'enfouissement (Bertrand, Quemener et Robert 2006).

Plusieurs autres paramètres peuvent encore être pris en compte, tels que la vitesse de diffusion, de déplacement réel dans l'aquifère du front d'humidification en zone non saturée ainsi que la transmission au sein de l'aquifère et la valeur du gradient hydraulique. Des valeurs faibles de ces paramètres permettent l'accréditation du site (Bertrand, Quemener et Robert 2006). De plus, la présence de ruisseaux de captage d'eau, à usage domestique ou non, doit être prise en considération lors de choix de la localisation de la fosse et il est nécessaire de s'écarter de 100 à 200 m des zones de captage et des berges (Antea 2010; Chabart, Chevrier et Blanc 2010; Fédération Nationale des Chasseurs 2019; DGAL 2019).

4.2.2.3 Topographie

La topographie est considérée essentiellement pour éviter la contamination des eaux de surface due au ruissellement des produits de décomposition de la fosse d'enfouissement (Bertrand, Quemener et Robert 2006; L. Miller et Flory 2018). La pente du terrain est donc un facteur important à prendre en compte (Bertrand, Quemener et Robert 2006). En effet, les terrains pentus favorisent le ruissellement et posent plus de problèmes que les terrains plats (Antea 2010; Bertrand, Quemener et Robert 2006; Chabart, Chevrier et Blanc 2010). De plus, le type de couverture de sol est également susceptible de favoriser le ruissellement lors de fortes précipitations. Les sols imperméables (argileux) sont donc à éviter et ce sont les couvertures avec une perméabilité importante (sols sableux) qui sont privilégiées car elles permettent la pénétration rapide des eaux de précipitation en profondeur et limitent ainsi le

²² Cette profondeur a été définie en fonction des caractéristiques de la fosse mais cette distance est peut-être à adapter en fonction de la masse de cadavres à gérer et des caractéristiques du sol.

²³ Un karst est un massif calcaire dans lequel l'eau a creusé de nombreuses cavités

https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/karst.php4 lien consulté le 27 mai 2021.

ruissellement (Antea 2010; Bertrand, Quemener et Robert 2006; Fédération Nationale des Chasseurs 2019).

Il est à noter que ce critère est en contradiction avec les recommandations géologiques vues précédemment lors du choix du site d'enfouissement, complexifiant davantage le choix du site (Bertrand, Quemener et Robert 2006).

L'évaluation de la topographie pour l'enfouissement de cadavres doit donc être réalisée au cas par cas, en prenant en compte l'ensemble des critères jouant un rôle dans le ruissellement (pente du terrain, nature du sol, proximité de zones de captages, environnement végétal).

4.2.2.4 Facteurs d'anthropisation

Le positionnement du site d'enfouissement sera également dépendant des infrastructures environnantes. Le site devra être éloigné des habitations, des lieux habités (incluant les terrains militaires), des sites archéologiques et des bâtiments d'élevage (Antea 2010; Chabart, Chevrier et Blanc 2010; Fédération Nationale des Chasseurs 2019). La distance d'éloignement doit être évaluée au cas par cas, en prenant en compte différents critères (topographie, saisonnalité, quantité de cadavres, etc.). De plus, sans accord du propriétaire, il est interdit d'enfouir des animaux sur un terrain privé. Le site devra être accessible pour les pelles mécaniques servant à creuser la fosse ou la tranchée mais devra être écarté des chemins de randonnée (Antea 2010; Fédération Nationale des Chasseurs 2019).

4.2.2.5 Aménagement et gestion de la fosse

Le choix du site d'enfouissement va également influencer les modalités et la gestion des sites d'enfouissement. Ainsi, le type de fosse, l'aménagement de la fosse, le type de remblais et l'utilisation du terrain post enfouissement seront impactés par les conditions rencontrées sur le terrain choisi pour accueillir les fosses (Bertrand, Quemener et Robert 2006).

- Le type de fosse choisi peut être déterminé en fonction de la masse d'animaux à enterrer. Concernant la profondeur des tranchées et des fosses, aucune recommandation n'a été trouvée. Cependant, il est recommandé par certains de ne pas creuser trop profond ($< 1,3$ m) afin que les cadavres se situent dans la partie biologiquement active du sol (Antea 2010). Néanmoins, des recommandations allant jusqu'à une profondeur minimum de deux à quatre mètres ont également été trouvées (Schmidt 2003). D'après le Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales canadien, il est difficile de déterminer la taille de la fosse dans la mesure où les animaux morts ont des formes irrégulières, en particulier s'ils sont gonflés ou raidis. De plus, le volume effectif des cadavres est difficile à déterminer, principalement parce que les différentes espèces animales ont des conformations différentes et qu'il peut aussi y avoir des poches d'air dans la fosse. Enfin, il n'y a pas d'étude sur les interactions des cadavres entre eux et sur les effets de ces éventuelles interactions sur la dégradation.
- La « densité effective d'un cadavre à l'enfouissement » (DECE) est le poids de l'animal à sa mort, divisé par le volume réel qu'il occupe dans une fosse (Fraser 2009). La DECE correspond selon les estimations à une fourchette de 175 à 1 000 kg/m³. Dans

cette étude, il est recommandé de planifier les opérations en utilisant une valeur de DECE fixée à 400 kg/m³ et d'utiliser la formule suivante :

$$L = Poids \div DECE \div largeur \div profondeur$$

dans laquelle le poids total des cadavres enfouis est exprimé en kg, la DECE en kg/m³, et la largeur et la profondeur de la fosse sont exprimées en m.

A titre d'exemple, l'enfouissement de 40 cadavres d'agneaux d'engraissement pesant au total 1 000 kg, pourrait être réalisé dans une fosse de 1,2 m de largeur, 1,2 m de profondeur et de 1,8 m de longueur.

La DECE pourrait être variable en fonction des espèces et, aux États-Unis, pour les volailles, la DECE est estimée entre 640 et 1 000 kg/m³ (Brglez 2003).

- Les aménagements de la fosse seront fonction de la pédologie et de la topographie du milieu choisi. Dans le cas de sol idéal à faible pente et de nature limono-argileux, le fond de la fosse sera simplement compacté. En effet, ces conditions défavorisent le ruissellement ainsi que le drainage trop important des effluents de la fosse. L'apport d'argile permet de contrer un drainage trop important dans le cas où le sol n'est pas suffisamment homogène (niveau sableux ou caillouteux). L'ajout d'argile peut se faire sur le fond de la fosse ou servir d'enduit tapissant la totalité de la fosse. Un chapeau d'argile au sommet de la fosse permet aussi d'éviter une trop forte infiltration. Dans le cas où la pente du terrain est trop importante, il est possible de placer un écran imperméable (i.e. argile de type bentonite de sodium) en amont de la fosse qui permettra l'assèchement de cette dernière. La pose de géomembranes²⁴ étanches peut être envisagée dans le cas où le milieu ne répond pas aux exigences (Bertrand, Quemener et Robert 2006).

Une fois l'enfouissement effectué, il sera nécessaire d'interdire l'accès au site à la fois à la population mais également à la faune sauvage (Bertrand, Quemener et Robert 2006), des charognards pouvant essayer de creuser pour atteindre les cadavres (Australia 2015). La durée de « quarantaine » est de six mois avant la mise en place de cultures et de neuf mois dans le cas du pâturage (Bertrand, Quemener et Robert 2006; DGAL 2019). Il est important de considérer que l'enfouissement est définitif et aura des conséquences à long terme, telles que l'interdiction de construire pendant plusieurs années : cinq ans dans les cas les plus favorables (Bertrand, Quemener et Robert 2006; DGAL 2019). Il sera donc nécessaire de répertorier la localisation de la fosse, la date de l'enfouissement, le type et la taille des animaux, les causes de la mort et le poids total enterré (Bertrand, Quemener et Robert 2006).

Enfin, il est à noter que les sites d'enfouissement ne sont pas toujours pré-identifiés, ce qui rend cette technique difficilement utilisable en cas d'urgence. De plus, cette méthode peut être controversée, dans la mesure où se pose la question des nuisances,

²⁴ Les géomembranes sont des géosynthétiques assurant une fonction d'étanchéité. Elles sont généralement utilisées pour remédier aux pertes d'eau par infiltration, ou pour éviter la migration de polluants dans le sol. Les géomembranes sont des produits adaptés au génie civil, minces, souples, continus, étanches aux liquides même sous des sollicitations de service.

Dans l'état actuel des techniques, ni les produits de faible épaisseur fonctionnelle (inférieure à un millimètre), ni les produits dont l'étanchéité est assurée uniquement par un matériau argileux, ne sont considérés comme des géomembranes

de la pollution et de l'impact, potentiellement à long terme, de l'enfouissement de milliers de cadavres.

4.2.3 Risques sanitaires et environnementaux

Bien que l'enfouissement en profondeur ne produise pas de chaleur, la compétition avec d'autres microorganismes et le processus de décomposition peuvent inactiver un certain nombre d'agents pathogènes. Pour autant, il ne s'agit pas d'une zone confinée, et les lixiviats générés par le processus de décomposition anaérobie des cadavres, dont une partie est susceptible d'être produite rapidement au cours du processus de décomposition, pénètrent lentement dans le sol et peuvent atteindre une éventuelle nappe phréatique. Le fait de percer les cadavres afin d'éviter qu'ils ne gonflent et remontent à la surface des zones d'enfouissement aura pour conséquence d'accélérer d'autant plus la libération des lixiviats. Les produits chimiques et microorganismes contenus dans les lixiviats peuvent alors atteindre les eaux souterraines et de surface et être ingérés par les êtres humains ou le bétail (L. Miller et Flory 2018; L.P. Miller, Milkis et Flory 2020).

Une surveillance de la qualité des eaux souterraines au niveau de sites d'enfouissement massifs de porcs infectés par le virus de la fièvre aphteuse à Taiwan en 1997 a montré une contamination par des indicateurs microbiologiques (coliformes fécaux, salmonelles, etc.) et chimiques (nitrites, nitrates, sulfates, etc.) mesurés (Hseu et Chen 2017).

Des résultats similaires ont été obtenus sur des suivis réalisés en Corée, suite à des enfouissements massifs de volailles et de porcins en lien avec des épizooties d'influenza aviaire et de fièvre aphteuse (Kaown *et al.* 2015; M.H. Kim et Kim 2017; Koh *et al.* 2019; Kwon *et al.* 2017). Toutes ces études, dont une portant sur près de 30 000 prélèvements (Koh *et al.* 2019), font état d'un impact des lixiviats sur les paramètres environnementaux (ions, en particulier Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- ...) et soulignent l'importance du suivi des sites d'enfouissement, *via* des systèmes de pompage et d'analyse des lixiviats ainsi que des systèmes de puits/forage permettant d'analyser l'eau située à proximité des sites. Les analyses statistiques réalisées par certains auteurs permettent de conclure que les taux de NH_4^+ , Cl^- , K^+ étaient bien dus aux lixiviats des fosses et ne pouvaient être imputés à d'autres activités (comme les pratiques agricoles) (Koh *et al.* 2019).

La contamination des eaux par des bactéries (coliformes en particulier) a aussi été décrite mais les résultats de ces études ne sont pas tout à fait concordants (et il est difficile de les comparer compte tenu de l'hétérogénéité des protocoles utilisés). Ainsi, certains auteurs ont indiqué que des contaminations microbiologiques avaient eu lieu (Koh *et al.* 2019), et pouvaient être durables (Hseu et Chen 2017), alors que d'autres indiquent que celles-ci sont faibles (Joung *et al.* 2013). Les contaminations microbiologiques semblent diminuer rapidement avec l'éloignement par rapport au site d'enfouissement. Ainsi, certains auteurs n'ont mis en évidence que peu de *Firmicutes* sur les prélèvements réalisés à une distance pourtant faible (7 m) des sites d'enfouissement (Kwon *et al.* 2017).

Les changements chimiques observés au sein des sols ne sont néanmoins pas homogènes selon la texture du sol. En effet, un sol ayant une texture sableuse (granulométrie plus élevée) engendrera un drainage plus rapide des lixiviats en profondeur. A l'inverse un sol limoneux (granulométrie plus fine) aura d'avantage tendance à retenir les fluides et limitera le drainage. Les sols limoneux offrent également l'avantage de contenir une grande diversité en organismes et microorganismes ce qui permet une décomposition plus rapide. Enfin, un sol

argileux (granulométrie très fine) agira comme une couche imperméable empêchant le drainage des lixiviats (Dias 2011; Martin *et al.* 2021).

Le Tableau 3 ci-dessous résume les principaux avantages et inconvénients de l'enfouissement.

Tableau 3 : Résumé des principaux avantages et inconvénients de l'enfouissement selon différents organismes

Source	Avantages	Inconvénients
FAO (2018) (L. Miller et Flory 2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Peut être réalisé sur l'exploitation - Facile et rapide à mettre en œuvre - Coûts faibles 	<ul style="list-style-type: none"> - Risques pour la santé publique - Risques pour la biosécurité - Persistance d'agents pathogènes - Non compatible avec approche de développement durable - Limitations réglementaires - Limitation de l'utilisation future du terrain concerné - Peut nécessiter l'utilisation d'une machinerie lourde ou d'un travail manuel excessif si la nécromasse à enfouir est importante
AUSVETPLAN (2015) (Australia 2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de gérer des effectifs élevés de cadavres appartenant à toutes les espèces (<i>s'il s'agit d'un enfouissement de masse, sur un site préalablement identifié</i>) - Mise en œuvre rapide, surtout si une autorisation a été obtenue au préalable - Processus continu, permettant de limiter l'exposition - Méthode de gestion discrète, peu exposée au regard du public (par rapport à d'autres méthodes) - Méthode reconnue et acceptée au niveau international - Permet la gestion concomitante d'autres matériels à éliminer (comme des litières contaminées par ex) 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque potentiel pour les eaux souterraines - Contraintes terrain : propriétés géologiques précises, pente limitée, accessibilité pour les machines. - Peut nécessiter la mise en place d'un dispositif de suivi - Risque pour les opérateurs (manipulation avec de larges équipements) - Respect de règles de biosécurité pour acheminer les cadavres jusqu'au site dédié - Traitements des lixiviats et des gaz à prévoir - Accessibilité du terrain pour les machines/matériels - Résistance de la part des riverains - Limitation de l'utilisation future du site - Ressources temps et coûts peuvent être élevées - Non adapté en zone habitée sauf si un site dédié a été pré-identifié
OMS (2008) (World Health et al. 2008)	<ul style="list-style-type: none"> - pas d'avantages listés - document restreint à la fièvre charbonneuse et l'enfouissement n'est pas adapté pour cette maladie 	<ul style="list-style-type: none"> - Des foyers ont été déclarés suite à des enfouissements de cadavres d'animaux atteints de fièvre charbonneuse. - Les charognards peuvent creuser pour accéder aux cadavres

Source	Avantages	Inconvénients
USDA (2004) (Consortium 2004)	<ul style="list-style-type: none"> - Creuser la fosse est simple (pas d'expertise technique particulière requise) - Pas d'équipement particulier nécessaire. Si nécessité de gros équipement pour un enfouissement de type enfouissement de masse, possibilité de louer ou de se procurer facilement le matériel (aux Etats-Unis) - Economique (mais dépend des modalités d'enfouissement) - Rapide - Pas de nécessité de transport si enfouissement sur site - Discrétion - Si enfouissement de masse : quantité de cadavres pouvant être traitée importante. 	<ul style="list-style-type: none"> - Détermination du site compliquée : celui-ci doit être adapté (pente, topographie, propriétés hydrologiques, proximité avec zones publiques, accessibilité) - Impacts environnementaux (eau en particulier) - Persistance possible de certains agents infectieux (<i>B. anthracis</i>, agents d'encéphalopathies spongiformes) - Contraintes réglementaires (peu de sites conviennent) - Interdiction si sol trop humide ou gelé - Utilisation des terres ensuite - Pas de production de sous-produit animal valorisable - Nécessité de transport (si enfouissement ailleurs que sur site d'élevage) - Lixiviats : si produits en grandes quantités, il faut les récupérer et les traiter (sur site ou les transporter vers une structure adaptée) - Résistance de la population (plus le nombre de cadavres augmente, plus la résistance augmente) - Suivi à long terme (coûteux)

L'enfouissement définitif en profondeur peut être réalisé sur le site de l'élevage ou sur un site communal dédié. Ce mode de gestion des cadavres nécessite de prendre en compte les caractéristiques du sol et du site : topographie, propriétés hydrogéologiques, proximité de l'eau (surface ou souterraine), lieux publics (lieux habités, terrains militaires, sites archéologiques, bâtiments d'élevage, etc.), accessibilité au site et utilisation future du site. Cette méthode reconnue au niveau international comporte des avantages : gestion d'un grand nombre de cadavres, rapidité et simplicité de mise en œuvre s'il existe une autorisation préalable, pas de transport des cadavres si l'enfouissement a lieu sur le site de l'élevage. Cependant, elle présente des inconvénients, les principaux étant les éventuels risques chimiques et biologiques suite à la percolation des lixiviats, le traitement des gaz à prévoir, la traçabilité, le suivi et la limitation d'utilisation future du site, l'acceptabilité par les riverains.

4.3 Utilisation de la chaux

Dans le cadre de la saisine, il est demandé au GT dans quelles circonstances l'utilisation de la chaux est nécessaire, en fonction des modalités d'enfouissement, et si l'utilisation de celle-ci permet de diminuer le risque de propagation d'agents pathogènes « *à un niveau faible (estimation de la dose équivalent au poids du cadavre si possible)* ».

L'opportunité d'utiliser la chaux sur des cadavres d'animaux lors de crises sanitaires pose question, et il est courant de trouver des recommandations diamétralement opposées. Un document issu de l'Ecole Nationale de la Santé Publique concernant l'enfouissement de cadavres d'animaux en cas d'épizootie majeure conclut que l'efficacité de la chaux vive comme activateur de la décomposition n'est pas scientifiquement avérée, et qu'il est même vraisemblable qu'elle en ralentisse le processus (Bertrand, Quemener et Robert 2006). Allant dans le même sens, le ministère de l'agriculture de l'Ontario déconseille explicitement d'ajouter de la chaux sur les cadavres enfouis²⁵. A l'inverse, la DGAL recommande que l'enfouissement de cadavres infectés/suspects, s'il est nécessaire, soit réalisé entre deux couches de chaux vive.

Une idée communément répandue depuis l'époque gréco-romaine est que la chaux vive pourrait être utilisée pour augmenter la vitesse de décomposition des cadavres, réduire la probabilité de leur détection, détruire les éléments de preuve et, au final, conduire à une destruction rapide et totale des restes humains. Pour cette raison, l'utilisation de la chaux est fréquemment observée dans des sépultures criminelles (E.M.J. Schotsmans *et al.* 2012). Pourtant, des observations archéologiques révèlent souvent l'utilisation de chaux, de gypse ou matériel générique qualifié de sépulture en plâtre, ces coutumes étant interprétées comme des rites de conservation ou des pratiques de prévention contre la contagion et les épidémies. D'autres observations faites en médecine légale suggèrent également que la chaux ralentit le processus de décomposition. D'une façon générale, les effets de la chaux sur les cadavres restent méconnus.

²⁵ <http://www.omafr.gov.on.ca/french/engineer/facts/09-030.htm>, lien consulté le 4 mai 2021.

L'union des producteurs de chaux recommande l'usage de la chaux en cas d'épizootie soudaine rendant nécessaire l'enfouissement de cadavres (Union des producteurs de chaux 2009). Cette dernière recommandation a plutôt pour objectif l'inactivation des micro-organismes potentiellement pathogènes présents dans les cadavres. De fait, les propriétés désinfectantes de la chaux sont connues, et celle-ci est couramment utilisée en agriculture, par exemple pour assainir fumiers ou lisiers, des bâtiments d'élevage ou encore des parcours en milieu extérieur. En revanche, l'effet désinfectant obtenu lors d'applications sur des cadavres d'animaux est incertain. Il apparaît donc nécessaire d'effectuer la revue des données disponibles sur les effets de la chaux sur les tissus mous et sur les microorganismes présents dans les cadavres, en lien avec les paramètres environnementaux.

4.3.1 Réglementation concernant l'utilisation de la chaux lors d'enfouissement de cadavres

Dans le cadre du règlement 528/2012/CE²⁶ concernant la mise sur le marché et l'utilisation des produits biocides, la chaux vive (CaO) a été évaluée en tant que substance biocide active. Cependant, aucune demande d'autorisation de mise sur le marché, et par conséquent aucune évaluation pour des produits à base de chaux destinés à l'usage « enfouissement des cadavres » n'a été réalisée.

Dans le dossier d'évaluation de la substance active, le risque environnemental lié aux utilisations revendiquées de la chaux (produits désinfectants et produits d'hygiène vétérinaire) a été évalué. Il est à noter que la chaux n'est pas persistante, bioaccumulable ou toxique et que l'impact potentiel de l'application de la chaux vive sur le sol est lié au changement brusque du pH. Ainsi, la concentration prédictive sans effet, déterminée pour le compartiment sol ($\text{PNEC}_{\text{soil}}$) en concentration équivalente de chaux hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) est de 108 mg/kg de sol. Cette valeur est considérée « conservatrice » du fait qu'une telle concentration de chaux ne provoque pas de changement significatif du pH du sol.

Dans le cas où l'usage de la chaux pour l'enfouissement des cadavres serait soumis au règlement biocide, des essais sur le terrain seraient nécessaires afin de suivre le devenir de la chaux dans l'écosystème qui entoure la zone d'enfouissement et de déterminer la quantité maximale de substance à utiliser pour respecter la $\text{PNEC}_{\text{soil}}$ autour de la zone.

4.3.2 Mode d'action de la chaux

Le terme générique chaux recouvre divers produits dont les modes d'action et utilisations peuvent différer. Concernant les usages agricoles et d'assainissement, sont généralement distinguées :

- la chaux vive, ou oxyde de calcium (CaO) ; CAS (*Chemical abstract service*) n°1305-62-0
- la chaux éteinte (dite également hydratée), ou hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ; CAS n°1305-78-8

²⁶ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0528&from=EN> lien consulté le 30 avril 2021.

La chaux vive est obtenue par calcination du carbonate de calcium (CaCO_3) calcaire à très haute température (800-1 200°C). L'adjonction d'eau à la chaux vive résulte en la formation de chaux éteinte au cours d'une réaction très exothermique. Exposée à l'air, cette chaux éteinte absorbe le CO_2 et redonne ainsi du carbonate de calcium.

Qu'elle soit vive ou éteinte, la chaux est un produit très alcalin pouvant augmenter le pH du milieu traité jusqu'à des valeurs supérieures à 12. Cette propriété est utilisée en agriculture pour réduire l'acidité excessive de certains sols agricoles et ainsi favoriser la décomposition des matières organiques par les bactéries du sol. Il en résulte la croyance populaire que recouvrir un cadavre de chaux peut accélérer sa décomposition. Cet effet est toutefois controversé. En effet, à des pH très élevés (>10), l'activité bactérienne décroît fortement, ce qui peut alors ralentir la décomposition (Consortium 2004). Ainsi, l'effet d'alcalinisation de la chaux peut avoir des effets favorables ou défavorables. Il peut effectivement provoquer l'inactivation des microorganismes pathogènes. En revanche, la perturbation des communautés bactériennes qui interviennent dans le processus de la décomposition est plutôt un facteur de ralentissement de ce processus.

Concernant la chaux vive, deux autres effets contribuent à son efficacité biocide ou antimicrobienne :

- une augmentation de la température, due à la chaleur dégagée lors de la réaction de la chaux vive avec l'eau. En condition d'enfouissement de cadavres, selon les conditions d'hydratation liées au sol, on observe des températures de l'ordre de 45-100°C pendant un temps court (durée non précisée, probablement dépendant de l'humidité), suite à l'application de la chaux vive. Cette augmentation de la température renforce la dénaturation des protéines en synergie avec l'environnement alcalin,
- une diminution de la disponibilité en eau dans le milieu où la chaux vive est appliquée. En effet lorsque la chaux vive est ajoutée à de la matière organique humide, une partie de l'eau est utilisée dans la réaction pour former de l'hydroxyde de calcium et une autre partie s'évapore du fait de l'augmentation de la température. Il est à noter que l'utilisation de la chaux n'est pas compatible avec la mise en place de géomembranes qu'elle détruit.

4.3.3 Résultats de la recherche bibliographique

Les étapes de la recherche bibliographique sont détaillées dans la partie 1.3.2.1 du présent rapport.

4.3.3.1 Effets généraux de la chaux sur la décomposition des cadavres

Peu d'articles scientifiques rapportent les effets de la chaux sur des cadavres animaux entiers. La plupart des rares études disponibles ont pour objet d'obtenir des données utilisables en criminologie humaine (détermination de la date et des conditions du décès) et sont réalisées sur des cadavres de porc (*Sus scrofa*). En effet, des observations classiques suggèrent que la décomposition des cadavres de porcs est similaire à celle des êtres humains du fait de la structure comparable de la peau, de la couche lipidique sous-cutanée, du taux de gras dans les muscles, de la masse corporelle et de la physiologie. Les différences majeures se situent principalement au niveau de la microstructure des os, des poumons, ce qui peut avoir une

influence sur l'environnement. Cependant ces différences sont considérées comme mineures au regard de l'intérêt d'utiliser les porcs comme modèles (E.M. Schotsmans, Denton, *et al.* 2014; E.M. Schotsmans, Fletcher, *et al.* 2014).

Des études rapportent les effets de la chaux sur des cadavres entiers de porcs enterrés dans des conditions de terrain (E.M. Schotsmans, Denton, *et al.* 2014; E.M. Schotsmans, Fletcher, *et al.* 2014; E.M.J. Schotsmans *et al.* 2012; Thew 2000).

Dans l'étude de Thew, les effets de la chaux hydratée sont étudiés sur six lots de cadavres de porcs juvéniles enterrés superficiellement ou en profondeur, pendant six mois ou pendant 30 mois (Thew 2000). Il est observé que la chaux hydratée ne retarde pas très significativement la décomposition. Les plus grandes différences de préservation des cadavres entre porcs « chaulés » et « non-chaulés » sont notées chez les porcs enterrés à faible profondeur pendant six mois. L'auteur conclut que les propriétés de préservation des cadavres par la chaux décroissent avec le temps, et ont une influence moindre aux profondeurs d'enfouissement les plus importantes.

Dans deux autres études, les effets de la chaux vive et de la chaux hydratée sont observés sur six cadavres de porcs enterrés dans un sol limoneux sableux en Belgique pendant six mois (étude à court terme) (E.M.J. Schotsmans *et al.* 2012) ou pendant 17 et 42 mois (étude à long terme) (E.M. Schotsmans, Fletcher, *et al.* 2014). Dans ces études, les cadavres sont recouverts avant enfouissement de 12,5 kg de chaux, soit une épaisseur de 5-6 cm pour la chaux vive et de 1-3 cm pour la chaux hydratée.

Dans l'étude à court terme, les six cadavres de porcelets (1,5 et 2 mois) pesant de 14 à 20 kg sont enterrés dans des fosses peu profondes et excavés au bout de six mois. Les résultats montrent que la décomposition générale est ralentie par les deux types de chaux utilisés, les cadavres chaulés étant visiblement mieux préservés. Les auteurs avancent que la chaux, même présente uniquement sur la partie supérieure, agit comme une barrière protectrice pour le cadavre entier (E.M. Schotsmans, Denton, *et al.* 2014).

Dans l'étude à long terme, menée dans le même type de sol, les six cadavres, pesant de 15 à 23 kg, sont évalués de manière qualitative (état de décomposition) et quantitative afin de matérialiser les différences de décomposition et de comparer les résultats avec ceux de l'étude à court terme. À nouveau, les résultats montrent que la décomposition est ralentie à la fois par la chaux vive et la chaux hydratée. Toutefois, la chaux ne préserve pas les cadavres sur le long terme et le résultat final après 42 mois d'enfouissement est, quelles que soient les conditions, une squelettisation du cadavre.

Une comparaison avec les enfouissements de six mois indique que les différences de décomposition, selon que les cadavres sont chaulés ou pas, sont plus importantes sur des intervalles de temps courts. A l'inverse, plus le processus de décomposition est prolongé, plus le stade de liquéfaction atteint est semblable entre les différentes conditions d'enfouissement.

Une autre étude des mêmes auteurs, mais cette fois menée en laboratoire (sans enfouissement), porte sur trois cadavres de porcs âgés de 20 à 24 semaines, pesant de 36 à 50 kg, utilisés comme analogues de cadavres humains (E.M. Schotsmans, Denton, *et al.* 2014). Les cadavres sont suivis pendant 78 jours sans ajout de chaux, avec de la chaux hydratée ou avec de la chaux vive (25 kg pour chaque), dans des containers en inox et en condition aérobie. Pendant les premiers stades, les résultats sont identiques pour les cadavres avec chaux hydratée et sans chaux, les organes internes étant légèrement plus préservés

avec la chaux hydratée que sans chaux. Une accélération initiale du processus de décomposition est observée avec la chaux vive, mais la décomposition est ensuite ralentie aussi bien pour la chaux vive que pour la chaux hydratée.

L'effet de l'environnement d'enfouissement sur la formation d'adipocire a également été étudié, cette fois sur des tissus de porcs (Forbes, Stuart et Dent 2005). Ces tissus adipeux contenant de la peau et du muscle sont enterrés pendant 12 mois en présence ou absence de chaux. L'étude montre que l'environnement d'enfouissement chaulé inhibe significativement la décomposition et réduit la formation d'adipocire. Selon les auteurs, cet effet est dû à l'extrême alcalinité de la chaux, qui empêche la survie et la prolifération des bactéries intervenant dans le processus de décomposition. Par ailleurs, ils observent que la formation d'une coque de chaux autour des tissus permet la préservation d'une grande partie de ceux-ci.

L'ensemble des résultats de ces auteurs suggère que la chaux vive peut accélérer le processus initial de décomposition de cadavres laissés à l'air libre. En revanche, en conditions d'enfouissement, la décomposition est globalement ralentie, aussi bien par la chaux vive que par la chaux hydratée, pour une période de quelques mois à plus d'un an. Sur des temps plus longs (plusieurs années), les différences s'effacent et les cadavres finissent par se squelettiser quelles que soient les conditions d'enfouissement, avec ou sans chaux. La formation d'une coque de chaux préservant les tissus est également possible, en fonction de l'humidité du sol au site d'enfouissement. Ainsi, si l'effet recherché est une accélération de la décomposition des cadavres, le bénéfice lié à l'utilisation de la chaux n'est pas certain, les effets de celle-ci semblant même plus néfastes que positifs pour les cadavres enfouis.

4.3.3.2 Effets généraux de la chaux sur les agents pathogènes

La chaux est utilisée depuis des siècles à des fins de désinfection dans des environnements agricoles (sols, bâtiments, etc...). En effet, ses propriétés alcalines lui permettent de détruire les bactéries et les virus par saponification des lipides membranaires, dénaturation des protéines et hydrolyse des acides nucléiques microbiens. Les qualités assainissantes, voire désinfectantes de la chaux, sont objectivées par de nombreuses études scientifiques. Néanmoins, dans celles-ci, l'effet de la chaux (ou plutôt de ses différents types) sur les agents pathogènes est souvent observé dans des conditions de laboratoire utilisant des substrats peu complexes (liquides homogènes, broyats, etc.) et/ou très différents de cadavres (boues d'épuration, lisiers, litières, etc.) et souvent en combinaison avec d'autres composés.

L'effet obtenu est difficilement extrapolable à des cadavres entiers ou à des monceaux de cadavres où les agents pathogènes peuvent être présents dans des tissus ou des cavités corporelles profondes auxquels la chaux n'a pas forcément accès. Les experts par ailleurs s'interrogent sur les conséquences des retards de décomposition liés à la chaux : pourraient-ils perturber la désinfection des cadavres en limitant l'effet biocide de la chaux aux parties superficielles des cadavres peu décomposés ? Malheureusement, seules quelques études rapportent des effets de la chaux sur des bactéries de cadavres entiers.

➤ Effets sur les bactéries

Lors d'une étude de laboratoire, les populations microbiennes aérobies des surfaces supérieures et inférieures de cadavres de porcs ont été analysées (E.M. Schotsmans, Denton, *et al.* 2014). Les densités des populations bactériennes observées sur les différentes surfaces de peau des porcs montrent que la chaux a un effet antibactérien avéré : les populations bactériennes sont moins denses sur la surface supérieure chaulée qu'au début de l'expérience ou que sur la surface inférieure non chaulée. En particulier, les bactéries entériques sont absentes des surfaces supérieures chaulées. Il apparaît toutefois que certaines bactéries du genre *Pseudomonas* peuvent survivre dans ce contexte alcalin. Il semble donc que la chaux réduit le nombre de bactéries aérobies en surface des cadavres enterrés, mais il existe des variations d'efficacité biocide selon les espèces bactériennes considérées : les bactéries entériques sont sensibles au traitement à la chaux, tandis que les populations de *Pseudomonas* sont éliminées moins efficacement.

Dans une autre étude, suite à un enfouissement de 17 et 42 mois (E.M. Schotsmans, Fletcher, *et al.* 2014), les populations bactériennes sont plus denses dans les sols sous les cadavres de porcs, que ceux-ci soient chaulés ou non, alors que la distribution bactérienne évaluée avant l'enfouissement était homogène. Selon les auteurs, ce résultat est expliqué par la décomposition avancée des cadavres, dont les produits peuvent servir de source de nutriments aux bactéries du sol d'une part, et qui favorise la dispersion des bactéries du tube digestif, d'autre part. L'importance des populations bactériennes, sous les cadavres de 42 mois réduits à l'état de squelettes, indique que ces ressources pourraient même être une source de nutriments pour une large gamme de micro-organismes naturellement présents dans le sol.

Quelques études réalisées sur des substrats autres que des cadavres entiers peuvent être citées.

Une étude menée sur de la litière de poulet traitée ou non avec de la chaux vive montre que l'introduction de 300 g/m² de chaux dans la litière de volaille réduit significativement sa contamination bactérienne. Les auteurs attribuent ce résultat à l'augmentation de température, de pH (jusqu'à des valeurs de 12-13) et la diminution de la disponibilité en eau (A_w = activity water) (Lopes *et al.* 2013).

Dans des travaux comparant l'activité bactéricide de divers désinfectants sur des copeaux de bois et des morceaux de peau de porc expérimentalement contaminés, la chaux vive apparaît plus efficace que des composés chlorés (hypochlorite de sodium, acide hypochloreux) pour inactiver les flores mésophiles et les coliformes totaux. Par ailleurs, celle-ci est présentée comme moins à risque pour une utilisation environnementale (car transformée en CaCO₃ par absorption de CO₂) (Sato *et al.* 2019).

Une autre étude menée en réacteur de laboratoire montre qu'un mélange de silice amorphe et de chaux hydratée peut inactiver efficacement, en quelques heures, des coliformes et des *E. coli* dans des lisiers de porcs (Tanaka *et al.* 2014).

Dans une autre étude, une synergie de la chaux éteinte hydratée mélangée en solution à de l'hypochlorite de sodium est mise en évidence pour inactiver des salmonelles (*S. enterica* serovar Infantis) et des *Escherichia coli*, l'effet biocide étant attribué au pH élevé et au calcium qui endommagent les membranes bactériennes (Toyofuku *et al.* 2017).

Afin d'évaluer la survie des spores de *Clostridium botulinum* et de *C. perfringens* dans des sous-produits animaux, une étude est menée en laboratoire avec de la viande hachée de

volaille, ainsi que de la viande et du sang de porc expérimentalement contaminés par des spores de *C. sporogenes* et additionnés de chaux (Bauza-Kaszewska, Paluszak et Skowron 2014). L'ajout de 70% de chaux vive conduit à l'inactivation complète des spores de *Clostridium* dans les déchets de viande après 48 h. Cet effet est dû à l'alcalinisation rapide de la biomasse, qui aboutit à des valeurs de pH dépassant 12.

Enfin, concernant d'autres bactéries pathogènes sporulées, une étude canadienne indique que, non seulement les spores de *Bacillus anthracis* pourraient survivre à la chaux, mais le calcium dont celle-ci est composée pourrait favoriser leur viabilité (Himsworth 2008). De ce fait, la Canadian Food Inspection Agency²⁷ ne recommande plus l'utilisation de chaux comme désinfectant agricole lors de foyers de fièvre charbonneuse.

➤ Effets sur les virus

Aucune étude ne rapporte les effets de la chaux sur les virus dans des cadavres entiers. Seules quelques études de laboratoire montrent l'effet virucide de la chaux.

En vue d'une application (biosécurité) dans des fermes avicoles, des tests d'efficacité virucide ont été réalisés en laboratoire sur deux agents pathogènes viraux (virus de l'influenza aviaire et virus de la maladie de Newcastle) en comparant l'effet de la cendre de charbon fraîche et de la chaux éteinte en présence ou absence de matières organiques. Les deux virus testés sont inactivés par la chaux, que celle-ci soit sous forme poudreuse ou liquide, et même en présence de matières organiques (Ruenphet *et al.* 2019). L'effet virucide est attribué à l'élévation de pH.

Une autre étude montre un effet virucide synergique de la chaux hydratée ajoutée à une solution d'ammonium quaternaire sur les virus de la maladie de Newcastle et de la bursite infectieuse. L'inactivation a lieu en 30 secondes à 25°C. À 2°C, l'inactivation nécessite une heure avec l'ammonium quaternaire seul, contre trois minutes avec le mélange (Ito *et al.* 2018).

Une étude réalisée *in vitro* montre l'inactivation efficace d'un norovirus murin par de la chaux éteinte, en solution saturée (0,17 %), en suspension ou en poudre, même en présence de matière organiques (dont des fèces) (Sangsriratanakul *et al.* 2018).

Il est observé qu'après addition de chaux à du lisier de porc, un pH de 11,5 est atteint et le virus de la maladie d'Aujeszky est inactivé. En comparaison, sans traitement à la chaux, seule une réduction d'un log du titre viral est observée après 11 jours à 4°C (Koch et Euler 1984).

Dans une autre étude de laboratoire, le virus de PPA et de la maladie vésiculeuse porcine (SVD) sont efficacement inactivés par l'adjonction de 1 % (PPA) ou 1,5 % (SVD) de chaux éteinte à du lisier de porc (Turner *et al.* 1998).

Une autre étude portant sur des virus de poissons (Herpès Virus de la Carpe Koi et virus de la septicémie hémorragique virale), mesurant des titres viraux après 24 h d'incubation, montre l'effet virucide de la chaux vive (Amtmann *et al.* 2020).

Enfin, dans une étude américaine, il est rapporté que lors de l'épisode anglais de fièvre aphteuse en 2001, le prétraitement à la chaux des lixiviats issus des cadavres, sur les sites d'enfouissement de masse, était arrêté après 40 jours, le virus de la FA ne survivant pas au-

²⁷<https://www.inspection.gc.ca/sante-des-animaux/animaux-terrestres/maladies/declaration-obligatoire/fievre-charbonneuse/elimination/fra/1363802986241/1363803524106> lien vérifié le 29 juin 2021.

delà de ce terme (Consortium 2004). Etant particulièrement sensible aux pH élevés (>11), ce virus est probablement inactivé de façon efficace lors du traitement des lixiviats par la chaux.

➤ Effets sur les autres agents pathogènes

Aucun article n'a été identifié décrivant les effets biocides de la chaux sur les moisissures. En revanche une publication indique que la croissance des moisissures est observée uniquement sur cadavre non chaulé (E.M. Schotsmans, Fletcher, *et al.* 2014).

Concernant les parasites, seuls deux articles décrivent l'effet de la chaux. Dans l'un d'eux, la chaux vive a été testée avec trois autres traitements pour sa capacité à inactiver des microsporidies présentes dans des lixiviats de décharge et des boues d'épuration (T. K. K. Graczyk 2007). Un effet d'inactivation à 100% sur les spores d'*Enterocytozoon bieneusi* et *Encephalitozoon intestinalis* a été observé. L'autre étude des mêmes auteurs montre qu'il en est de même pour *Cryptosporidium* et *Giardia* (Graczyk *et al.* 2008).

Apparemment, aucune référence bibliographique ne concerne l'effet de la chaux sur les flores microbiennes d'un cadavre (mis à part *Pseudomonas*). Néanmoins, les experts supposent que l'action de la chaux est équivalente sur les deux populations (nécrobiome et agents pathogènes) et que, de ce fait, la chaux ne favorise pas l'évolution des agents pathogènes en détruisant préférentiellement la flore normale du nécrobiome.

Le Tableau 4 ci-dessous résume les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation de la chaux.

Tableau 4 : Avantages et inconvénients de l'utilisation de la chaux

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Usage ne nécessitant pas d'équipement lourd et peu coûteux (inférieur à 200 euros la tonne de chaux vive) - Accélération initiale de la décomposition par la chaux vive (réaction exothermique facilitant la rupture des cadavres et induisant des températures internes favorables aux bactéries) - Inactivation de la plupart des agents pathogènes : réduction avérée de certaines populations bactériennes à savoir les bactéries entériques ou <i>Clostridium</i> (sur cadavres ou sur parcours) et de virus en laboratoire mais les études restent à compléter - Habituellement facilement disponible 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité de respecter les conditions d'usage prescrites par le fournisseur et surveiller les modalités d'application (chaux vive) - Ralentissement de la décomposition sur le long-terme (chaux vive et chaux éteinte), voire préservation des tissus si formation d'une coque (si humidité suffisante) - Inactivation moins efficace de certaines bactéries, comme observé sur <i>Pseudomonas</i> et efficacité non démontrée sur les spores charbonneuses. A l'inverse, le calcium de la chaux pourrait favoriser leur viabilité. - Modification locale des caractéristiques du sol (quand la dose de chaux utilisée est supérieure à la PNEC du sol) : alcalinisation, perturbation des communautés bactériennes autochtones.

Peu d'études menées sur des cadavres entiers rapportent les effets de la chaux, sur la décomposition ou l'assainissement (inactivation d'éventuels agents pathogènes) des cadavres et/ou des sites de leur stockage ou d'enfouissement. Il résulte de ce manque de données, des recommandations d'usage diamétralement opposées selon les documents considérés, en France comme à l'international. Les effets de la chaux (vive ou éteinte) sur les cadavres enterrés restent donc globalement très mal connus.

Les études de laboratoire indiquent que, hors enfouissement et en conditions aérobies, la chaux vive peut accélérer le processus de décomposition dans un premier temps. En revanche, dans les études d'enfouissement à court terme (quelques mois) et à plus long terme (plus d'un an), c'est plutôt un ralentissement de la décomposition qui est observé, aussi bien pour la chaux vive que pour la chaux éteinte. Il est probable que ce ralentissement soit dû, au moins en partie, à la perturbation des communautés microbiennes normalement impliquées dans ce processus. Après plusieurs années d'enfouissement, les cadavres finissent par se « squelettiser » quelles que soient leurs conditions d'enfouissement, avec ou sans chaux.

L'effet biocide de la chaux (vive ou éteinte) est largement démontré en conditions de laboratoire. En revanche, sa capacité à assainir des cadavres entiers stockés ou enfouis et à empêcher la diffusion d'agents pathogènes à partir de sites de stockage ou d'enfouissement

est incertaine. Cette capacité est probablement très dépendante de l'espèce animale et de la quantité de la nécromasse à traiter, ainsi que des conditions environnementales lors de l'application (types de sol, humidité, etc.).

En résumé, dans l'état actuel des connaissances, le bénéfice lié à l'utilisation de la chaux sur les cadavres enfouis ou stockés n'est pas clairement établi. Cette utilisation ne peut donc pas être recommandée de façon systématique. Toutefois, il est possible que certaines situations soient propices à l'utilisation de la chaux. Ces situations restent à identifier, et le cas échéant, le type de chaux, les doses et les protocoles à utiliser. Les mortalités animales massives, d'origine infectieuse ou environnementales, pourraient être l'occasion de réaliser des essais en conditions de terrain pour comparer la dégradabilité et l'assainissement de cadavres entiers traités ou pas à la chaux, en fonction des conditions de stockage ou d'enfouissement. Outre l'assainissement des cadavres eux-mêmes, il pourrait être intéressant de tester un « effet barrière » de la chaux appliquée aux alentours d'une zone d'enfouissement, pour éviter la dispersion d'agents infectieux particulièrement résistants et diffusibles.

En tout état de cause, le passage d'une utilisation largement empirique de la chaux pour traiter les cadavres, à une utilisation raisonnée et objectivée par des études ciblées serait une avancée importante dans la gestion des crises sanitaires animales.

4.4 Le compostage des cadavres sur le site de l'exploitation

4.4.1 Définition

Le compostage est un processus biologique naturel de décomposition de matières organiques dans un environnement à prédominance aérobie. Pendant le processus, les bactéries, champignons et autres microorganismes décomposent les matières organiques en un mélange stable (compost pouvant servir d'amendement des sols) tout en consommant de l'oxygène et en libérant de la chaleur, de l'eau, du dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres gaz (H.M. Keener et Elwell 2000). Le compostage des cadavres d'animaux n'est pas autorisé en Europe sur le site de l'exploitation.

Un traitement très proche du compostage mais sans finalité d'amendement des sols est autorisé en Europe et en France, il s'agit d'une méthode de confinement (Règlement 142/2011/CE²⁸ Annexe IX chap. V) qui consiste en une maturation aérobie et entreposage des porcs morts elle peut s'effectuer dans le cadre d'un agrément sanitaire. Dans ce cas, les produits ne peuvent être destinés qu'à une usine d'incinération ou de coïncinération. « Cette méthode n'est applicable qu'à l'élimination d'animaux de l'espèce porcine provenant de la même exploitation, pour autant que celle-ci ne fasse pas l'objet de restrictions motivées par un foyer suspecté ou confirmé d'une maladie transmissible grave chez lesdits animaux, ou d'animaux ayant été abattus à des fins de lutte contre une telle maladie (point 2 du A de la section 2 du chapitre V de l'annexe IX du R 142/2011) ». Dans le cas de la méthode utilisée en Europe, il n'y a pas d'étape de retournement (Anses 2013). L'EFSA dans son avis de 2012 indiquait que les températures atteintes pendant cette maturation n'étaient pas en mesure d'inactiver les dangers sanitaires qui pourraient être présents dans le matériau à traiter et le produit final doit toujours être considéré comme de C2 (EFSA 2012).

²⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/?uri=CELEX:32011R0142>. Lien consulté le 29 juillet 2021.

Dans la suite du chapitre, il ne sera question que du compostage de cadavres d'animaux sur le site de l'exploitation tel que pratiqué en Amérique du Nord.

L'utilisation du compostage pour l'élimination de routine des cadavres de porcs et de volailles en ferme augmente aux États-Unis et au Canada depuis 30 ans. Il est même utilisé pour les cadavres de bovins (Bonhotal, Schwarz et Rynk 2014). Enfin, toujours sur le continent américain, le compostage a été utilisé pour gérer les problèmes de surmortalités liées à l'influenza aviaire. Pour toutes ces raisons, et malgré l'interdiction de recours au compostage en Europe, le GT a souhaité s'intéresser à cette méthode.

Quatre variables sont considérées comme essentielles à un compostage réussi : (1) la teneur en humidité (40 à 60 %), (2) la température (45 à 60°C), (3) la concentration d'oxygène (niveau souhaitable de 10 %) et (4) le rapport carbone : azote (C:N) (plage souhaitable de 20:1 à 30:1) (Chiumenti *et al.* 2005; H. M. Keener, Elwell et Monnin 2000; K. G. Wilkinson 2007).

4.4.2 Modalités et contraintes

Le processus de compostage se déroule essentiellement en deux phases : une phase primaire thermophile (températures allant jusqu'à 70°C) et une phase secondaire mésophile (généralement 30 à 40°C) (Kalbasi *et al.* 2005) (Figure 11).

La température et le maintien de la température sont des facteurs importants dans la destruction d'agents pathogènes infectieux. Une température de 54°C pendant trois jours, typique du compostage de cadavres, devrait inactiver de nombreux agents pathogènes à l'exception des spores et des prions (Sander, Warbington et Myers 2002). Les études sont controversées concernant l'élimination de *Mycobacterium avium* subsp. *paratuberculosis* (Morgan et Macdonald 1969; Paul et Geesing 2009; Tkachuk *et al.* 2013).

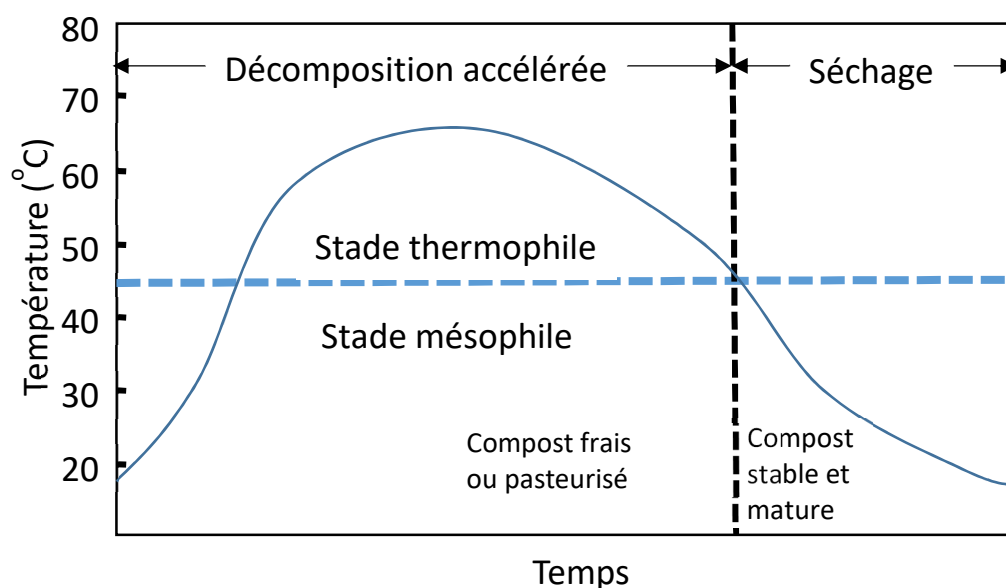


Figure 11 : Stades de compostage et évolution de la température (d'après (K.G. Wilkinson *et al.* 2003))

Pour limiter les coûts à la ferme, le compostage des cadavres se fait généralement en produisant une pile ou tas statique qui n'implique pas d'équipement spécialisé de mélange, de broyage, de retournement, d'aération et de criblage souvent utilisés dans le compostage industriel.

La dégradation du cadavre est initiée par des bactéries anaérobies naturelles dans le cadavre et par des bactéries aérobies sur les surfaces extérieures. Les gaz et liquides odorants diffusent dans des matières végétales plus sèches et plus aérobies où ils sont ingérés par des microorganismes et dégradés en composés organiques plus simples et finalement en CO₂ et en eau (H. M. Keener, Elwell et Monnin 2000). Le succès de cette opération repose sur la construction soigneuse d'un tas en couches utilisant des quantités appropriées de matériaux de couverture d'origine en dessous, entre et au-dessus des cadavres. Les caractéristiques des matériaux de couverture efficaces comprennent une capacité de rétention d'eau, une perméabilité ou une porosité aux gaz (oxygène pour l'activité microbienne), une biodégradabilité, une résistance mécanique à l'état humide et une quantité suffisante de carbone. Ces caractéristiques physiques déterminent la capacité des matériaux de couverture à absorber les liquides en excès, à empêcher le rejet de lixiviats et les odeurs ((King, Seekins et Hutchison 2005). Une variété de résidus à base de végétaux a été utilisée comme matériaux de couverture, y compris la sciure de bois, les copeaux de bois, les tiges de maïs moulues, la paille ou le foin moulu, les coques d'avoine ou d'arachide, la litière de volaille ou de bétail, le fumier sec, etc. (Glanville 2006; H.M. Keener et Elwell 2000; Mukhtar, Kalbasi et Ahmed 2004).

Le retournement d'une pile peut être nécessaire pour briser les zones humides et pour introduire plus d'oxygène et d'humidité, si nécessaire, pour réactiver l'activité microbienne aérobie et stimuler un cycle secondaire de production de chaleur. Une fois le cycle de chauffage secondaire terminé, la décomposition des tissus mous est généralement terminée et le compost est suffisamment stable pour être stocké avant l'épandage²⁹ sur le terrain. Sur la base d'une revue de la littérature, des auteurs ont conclu que les temps de décomposition sont en grande partie fonction de la masse de cadavres, et ils ont publié des équations de prédiction basées sur le poids pour la durée des cycles primaire et secondaire du compostage (H. M. Keener, Elwell et Monnin 2000).

Dans la pratique, la majorité du compost n'est retourné qu'une ou deux fois. Aux États-Unis, au moins un retournement est exigé lorsque le compostage est utilisé dans le cadre de la destruction à grande échelle de cadavres lors de dépeuplement en ferme (David Swayne, communication personnelle). Le retournement accélère la décomposition du cadavre, mais il n'est pas essentiel si la source de carbone utilisée pour recouvrir les cadavres est suffisamment perméable pour la diffusion de l'oxygène dans le tas (Glanville 2006). Un autre moyen utilisé pour accélérer la décomposition de cadavres de grande taille consiste à les fractionner ou à les ouvrir pour exposer plus de surface (Sander, Warbington et Myers 2002). Mais d'autres auteurs ont fait remarquer que ce processus pouvait augmenter les risques de blessures du personnel et l'exposition à des agents pathogènes ; cette étape ne serait pas justifiée considérant l'impact relativement mineur sur la durée de la décomposition des cadavres (Murphy *et al.* 2004). Par contre, le broyage des cadavres et des matériaux de couverture avant le compostage réduirait le temps de décomposition de 30 à 60% et

²⁹ Le compost a une teneur en éléments nutritifs similaire à celle du fumier, il est généralement moins riche en azote et légèrement plus riche en phosphore et en potassium), <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ncr/ncr-530.html> lien consulté le 31 mai 2021.

diminuerait de façon appréciable la quantité de matériaux de couverture nécessaire pour l'opération.

Le compostage à la ferme est généralement effectué dans des bacs ou des tas d'andains³⁰ ouverts. Les bacs à trois côtés sont typiques, avec l'extrémité ouverte permettant l'accès pour le placement, le retournement et l'enlèvement du compost à l'aide d'un tracteur. Les structures permanentes sont construites avec du bois traité ou du béton et sont généralement construites sur une plate-forme en béton pour fournir une surface de travail fixe. Le compostage en andain implique la construction de piles longues et étroites ayant une section transversale parabolique ou trapézoïdale. En raison de leur forme, les andains ont une grande surface exposée qui encourage l'aération et le séchage (Mukhtar, Kalbasi et Ahmed 2004). Du fait que les dimensions des andains ne sont pas contraintes par les parois, leurs dimensions peuvent être adaptées à n'importe quelle taille et nombre de cadavres, ce qui les rend particulièrement utiles en cas de mortalité importante d'animaux. Bien que les andains ne nécessitent pas la construction d'une structure pour contenir le compost, une base à faible perméabilité est recommandée pour éviter la contamination par les lixiviats du sol sous-jacent (ex : béton ou asphalte; gravier doublée de tissu en plastique ou géotextile; sol compacté) (H.M. Keener et Elwell 2000). Les proportions de la pile sont importantes dans le compostage en andains parce que les dimensions affectent l'entrée d'oxygène, la rétention d'humidité et la stabilité de la pile. Pour des performances optimales, des auteurs ont recommandé une largeur maximale de l'andain d'environ 3,9 m et une hauteur de la pile de 1,8 m pour les cadavres de taille moyenne (moutons et jeunes porcs), et une base de 4,5 m en largeur et de 2,1 m en hauteur pour les gros animaux (Mukhtar, Kalbasi et Ahmed 2004).

La bonne aération du compost est un critère important de succès du processus. Il existe des appareils permettant de souffler les matériaux de compostage dans un tube en plastique de 1,52 à 3,05 m de diamètre et pouvant atteindre 61 m. L'aération du compost est réalisée par des souffleurs mécaniques qui forcent l'air à travers des tuyaux de distribution et des orifices de ventilation installés à l'intérieur du tube de plastique au moment où il est rempli (Mukhtar, Kalbasi et Ahmed 2004).

4.4.3 Risques sanitaires et environnementaux (avantages/inconvénients)

Le compostage réalisé dans un contexte de mortalités dues à certains agents pathogènes (fièvre aphteuse, influenza aviaire, etc.) nécessite l'utilisation de matériaux de couverture hautement biodégradables qui optimisent la production de chaleur, l'utilisation de bâches en plastique ou de couches plus épaisses de matériau pour envelopper le compost et favoriser la rétention des agents pathogènes avant leur inactivation. Le nombre de retournements du compost peut aussi être retardé ou réduit pour minimiser le risque de dispersion d'agents pathogènes. Évidemment, dans ces circonstances, un programme de surveillance de la température et d'échantillonnage du compost pour documenter l'inactivation des agents pathogènes est de mise.

³⁰ L'andain est une bande continue de fourrage, de paille ou d'autres matériaux déposée au sol.

Le compostage à grande échelle s'est montré très efficace en Amérique du nord lors d'épizooties dues aux virus influenza aviaire (Figure 12 ci-dessous lors de l'épizootie de grippe aviaire H7N3 en Colombie-Britannique en 2004).



Figure 12 : Compostage à grande échelle en Amérique du Nord (crédit photo BC Ministry of Agriculture, 2006)

Plusieurs études indiquent que le compostage semble efficace pour éliminer les agents pathogènes infectieux endémiques de la volaille et du porc. En principe, un compostage en andain à grande échelle serait efficace pour l'élimination d'un grand volume de cadavres. Par exemple, le compostage semble bien fonctionner contre le virus de la diarrhée épidémique porcine. La matière collectée à partir de coupes d'andain après 36 jours de compostage fournissait un résultat négatif au test qRT-PCR, malgré une décomposition incomplète des tissus mous (Vitosh-Sillman *et al.* 2017). Par ailleurs, une étude conduite au Canada, à partir de trois cadavres de porcs infectés par la fièvre aphteuse compostés a montré que le virus avait été inactivé dans le compost après 10 jours et l'ARN viral dégradé dans la peau et les organes internes au 21^{ème} jour. La température du compost avait alors atteint 50°C et 70°C après respectivement 10 et 19 jours (Guan *et al.* 2010).

Il existe peu d'informations sur le devenir des prions ou des bactéries sporulantes telles que *Bacillus anthracis* lors du compostage de cadavres, ce qui l'empêche d'être considéré comme méthode adéquate de destruction des cadavres par l'Union Européenne. L'inactivation de prions est difficile : elle nécessite une exposition à une chaleur de 980 à 1 100°C, à 132°C pendant 90 minutes en autoclave vapeur ou à une digestion alcaline. Ces conditions ne se rencontrent pas dans le processus de compostage. Cependant, il existe des preuves que certaines enzymes et la concurrence d'organismes microbiens pourraient avoir un effet bénéfique réduisant la présence de prions lors du compostage (Bonhotal, Schwarz et Rynk 2014). Par contraste, en Amérique du Nord, à moins d'une suspicion sérieuse d'infection par des prions, le compostage est considéré comme un excellent moyen d'éliminer la très vaste majorité des agents pathogènes infectieux d'intérêt pour les industries animales et les autorités gouvernementales. Autrement dit, les avantages liés au compostage, dont l'élimination du

déplacement de matières organiques contaminées, sont considérés bien supérieurs aux désavantages.

En Amérique du Nord, il est recommandé que le compostage d'urgence des cadavres de lots d'animaux atteints de grippe aviaire soit effectué dans les poulaillers pour diminuer la probabilité de dispersion du virus par le vent ou *via* la contamination de l'environnement (Tablante *et al.* 2002). Cette approche n'est pas toujours envisageable dans les élevages porcins, car les enclos et autres équipements dans ces élevages limitent l'application de cette stratégie. Néanmoins, le compostage de cadavres présente des avantages, notamment la production de sous-produits animaux de valeur, la facilité de manipulation du compost et la destruction des agents pathogènes par la chaleur. De plus, les cadavres sont confinés, ce qui limite la propagation de contaminants chimiques ou biologiques (L. Miller et Flory 2018; L.P. Miller, Milkis et Flory 2020). Les nutriments chimiques s'infiltreraient à environ 120 cm sous la surface du sol (Glanville 2008). Le compostage serait ainsi moins susceptible d'affecter les eaux souterraines ou de surface qu'un enfouissement. Les lixiviats des andains de compost pour gros animaux peuvent causer une contamination des sols peu profonds lorsque le compostage est effectué sur un sol non compacté, mais les risques pour les eaux souterraines du compostage d'urgence sont inférieurs à ceux induits par l'enfouissement (Glanville 2008). Les principaux inconvénients comprennent la longue durée du traitement, le coût des matériaux, la production possible d'odeurs désagréables et la présence d'insectes comme les mouches si le processus n'est pas réalisé correctement (J.-H. Lee *et al.* 2020). Enfin, le processus dépend fortement des matériaux utilisés et de la technicité des opérateurs (Tableau 5, reprenant les principaux avantages et inconvénients du compostage), avec pour conséquence probable une variabilité en termes d'impact sur l'inactivation d'agents pathogènes ou encore sur la production de lixiviats (il est nécessaire de contrôler la montée en température en surface et en profondeur du compost pour vérifier l'efficacité de ce procédé sur l'inactivation des agents pathogènes)

Tableau 5 : Résumé des principaux avantages et inconvénients du compostage.

Source	Avantages	Inconvénients
FAO (2018) (L. Miller et Flory 2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Sûr - Durable - Peut se faire sur le site de l'exploitation - Facile à mettre en œuvre 	<ul style="list-style-type: none"> - Durée longue de mise en œuvre - Coût élevé - Processus lent - Personnel formé/expérimenté pour mettre en œuvre et surveiller le bon déroulement du processus de compostage
AUSVETPLAN (2015) (Australia 2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode ne nécessitant pas de matériel lourd ou sophistiqué - Possible sur site ou à l'extérieur du site d'élevage - Méthode envisageable si des contraintes (terrain, niveau de nappe phréatique) excluent d'autres méthodes - Intervention par des opérateurs extérieurs possible - Destruction des agents pathogènes (à l'exception de <i>B. anthracis</i> ou agents d'encéphalopathies spongiformes transmissibles) - Mise en œuvre rapide si matériel de co-compostage nécessaire disponible - Permet de recycler les carcasses, d'obtenir des sous-produits animaux commercialisables (pour certaines utilisations) - Permet, en plus des cadavres, de traiter certains matériels de l'élevage (ou produits industriels) - Ne nécessite pas de suivi à long terme - Véhicule une image écoresponsable 	<ul style="list-style-type: none"> - Peut nécessiter de disposer de beaucoup d'espace - Peut nécessiter des quantités importantes de matériaux de co-compostage - Génération d'odeurs ou contamination du sol si mauvaise gestion - Nécessite un suivi quotidien durant la première phase - Risque en termes de biosécurité en cas d'élévation de température insuffisante - Processus lent, ce qui peut allonger le délai de mise en quarantaine d'un site (si compostage fait sur site) - Processus pouvant être négativement impacté par des conditions climatiques particulières - Peu d'informations sur la gestion de nombres élevés de cadavres de grands animaux - Pas d'information sur le compostage de cadavres d'animaux à toison épaisse - Résistance potentielle de la part de la population locale - Nécessité de transporter les cadavres si compostage réalisé sur un autre site - Si utilisation d'un site extérieur, nécessité d'avoir organisé et planifié ces opérations en amont

Source	Avantages	Inconvénients
		<ul style="list-style-type: none"> - Peut nécessiter de réaliser des analyses libératoires avant d'utiliser le compostage - Manipulation de cadavres (pour les disposer convenablement)
USDA (2004) (Consortium 2004)	<ul style="list-style-type: none"> - Destruction d'une partie des agents pathogènes (températures, production de substances antibiotiques par actinomycètes, champignons...) - Possible sur site d'exploitation - Possibilité d'utiliser du matériel (machines...) non spécifique - Obtention d'un produit utilisable/valorisable (pas en Europe) 	<ul style="list-style-type: none"> - Survie d'agents tels que protéines prions, bactéries sporulantes (comme <i>B. anthracis</i>) ou même <i>Mycobacterium tuberculosis</i> - Destruction pas homogène (le compost est un milieu hétérogène, avec des conditions de températures différentes d'un point à l'autre), donc la dégradation pourrait n'être que partielle - Technicité pour un bon déroulement du processus - Suivi du processus (température, humidité...) - Des cadavres qui ont gelé ne peuvent être compostés (il faut les décongeler avant) - Processus lent - Dispositions du terrain (légère pente : 1 à 3%), pas de point d'eau à proximité (et nappe phréatique à au moins 90 cm de profondeur)

Le compostage est un processus biologique naturel de décomposition de matières organiques dans un environnement à prédominance aérobie. Les produits finaux sont destinés à l'amendement des sols.

Pour la bonne mise en œuvre du compostage, quatre variables doivent être maîtrisées : la teneur en humidité (40 à 60 %), la température (45 à 60°C), la concentration en oxygène (~ 10%) et le rapport carbone: azote (entre 20:1 à 30:1).

Plusieurs études indiquent que le compostage est efficace pour éliminer la plupart des agents pathogènes infectieux endémiques des volailles et des suidés. Cependant, cette méthode est interdite par l'Union Européenne car il existe peu d'informations sur le devenir des prions ou des bactéries sporulantes telles que *Bacillus anthracis* lors du compostage de cadavres. Cette modalité comporte toutefois certains avantages : possibilité de mise en place rapide sur le site d'élevage, élimination d'un grand nombre d'agents pathogènes. Cependant, elle présente également des inconvénients : processus lent et coûteux nécessitant un suivi au démarrage et dépendant de la technicité des opérateurs, génération d'odeurs ou contamination du sol en cas de mauvaise gestion, manipulation des cadavres.

La maturation aérobie des cadavres de porcs est une méthode autorisée en Europe, proche du compostage mais considérée comme une méthode de confinement, les produits finaux devant être incinérés dans des établissements agréés.

4.5 Le recouvrement en surface des cadavres sur site

4.5.1 Définition

Le recouvrement en surface est une méthode hybride entre l'enfouissement en profondeur et le compostage. Comme pour l'enfouissement en pleine terre, le recouvrement implique d'entasser les cadavres d'animaux dans une tranchée excavée dans l'exploitation. Ce dispositif permet d'accroître l'activité microbienne tout en minimisant le potentiel de contamination de la nappe phréatique par les lixiviats (L. Miller et Flory 2018).

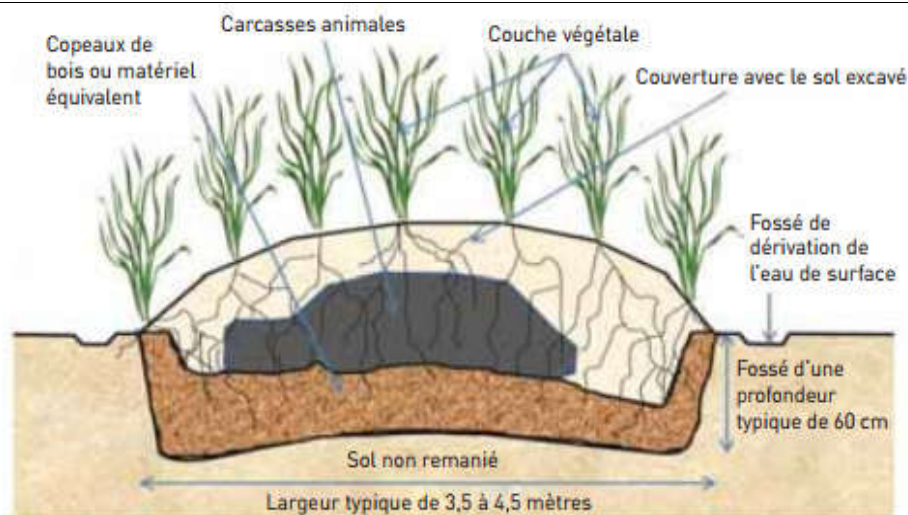


Figure 13 : Recouvrement en surface (L. Miller et Flory 2018)

4.5.2 Modalités et contraintes

Dans le cas du recouvrement, la tranchée est moins profonde que dans le cas de l'enfouissement en profondeur et comprend une base en matériaux carbonés tels que de la paille ou des copeaux de bois. La profondeur utilisée n'est pas supérieure à 60 cm. La quantité de matériaux carbonés à ajouter doit permettre de tapisser le fond de la tranchée à une hauteur de 30 cm. Les cadavres sont ensuite placés sur cette couche de matériaux. Le sol excavé sert à recouvrir les cadavres pour former un monticule sur lequel est planté un capuchon végétal. Les végétaux sélectionnés doivent être adaptés à la région et à la saison et doivent être facilement disponibles. Enfin, un périmètre est creusé autour du monticule pour empêcher l'intrusion de l'eau de surface. Une fois la décomposition achevée, le site peut être nivelé et utilisé comme il l'était auparavant. Ce processus prend entre neuf et douze mois selon l'environnement (L. Miller et Flory 2018).

4.5.3 Risques sanitaires et environnementaux (avantages/inconvénients)

La combinaison d'un semi-enfouissement et d'un compostage (méthode hybride) semble peu adaptée car l'enfouissement va à l'encontre de l'objectif du compostage qui permet aux gaz toxiques comme l'ammoniac et le sulfure d'hydrogène de se dissiper tout en permettant à l'oxygène de pénétrer dans les cadavres pour faciliter l'action des bactéries thermophiles / microaérophiles qui aident à la dégradation biologique de ces cadavres. En fait, l'enfouissement, même peu profond, devrait empêcher les échanges de gaz essentiels à la dégradation.

Cependant, certains auteurs ont démontré qu'un enfouissement de cadavres préparé comme pour un compost permet d'activer le processus de décomposition des cadavres (Ki *et al.* 2017). Ils ont réalisé un projet pilote à partir de cadavres de porcs, en comparant les performances de décomposition du système hybride à un enfouissement traditionnel et à un compostage standard. Les performances ont été suivies pendant 346 jours. Le taux de dégradation obtenu par l'enfouissement-compostage était plus rapide que celui de l'enfouissement du sol, mais

plus lent que le compostage. D'un point de vue olfactif, cette méthode hybride était également supérieure aux deux autres, à savoir qu'il y avait moins d'odeurs désagréables.

Le stockage en surface ne permet pas de créer de chaleur permettant d'inactiver les agents pathogènes. Même s'il s'agit d'une zone confinée (entourée de copeaux), des animaux comme des charognards peuvent y avoir accès (L. Miller et Flory 2018; L.P. Miller, Milknis et Flory 2020).

Il est à noter que peu d'études décrivent cette méthode.

Le Tableau 6 ci-dessous résume les principaux avantages et inconvénients du recouvrement en surface.

Tableau 6: Résumé des principaux avantages et inconvénients du recouvrement en surface.

Source	Avantages	Inconvénients
FAO (2020) (L.P. Miller, Milknis et Flory 2020)	<ul style="list-style-type: none">- Sûr- Possible à la ferme- Rapide à mettre en œuvre- Bonne acceptabilité par le public- Pas cher	<p>FAO 2018 : Survie de certains agents pathogènes; accès aux charognards</p> <ul style="list-style-type: none">- Processus long (9-12 mois avant de pouvoir réutiliser le terrain)
AUSVETPLAN (2015) (Australia 2015)	<ul style="list-style-type: none">- Possible sur site d'élevage	<ul style="list-style-type: none">- Génère des sous-produits animaux qu'il conviendra d'éliminer- Nécessité de suivre le site d'enfouissement
USDA (2004) (Consortium 2004)	<ul style="list-style-type: none">- Possible de recourir à cette technique sur des sites sur lesquels l'enfouissement en profondeur est impossible (du fait de contraintes géologiques par exemple)- Mêmes avantages qu'enfouissement (méthode assimilée)	Non décrit

Le recouvrement en surface est une méthode hybride entre l'enfouissement en profondeur et le compostage des cadavres. Cette méthode est facile à mettre en place et peu coûteuse, entraînant moins de nuisances olfactives que le compostage. Cependant, elle offre un accès possible aux charognards et peu d'éléments scientifiques sont disponibles concernant cette modalité de gestion des cadavres, notamment sur l'inactivation d'agents pathogènes.

4.6 Autres modalités de gestion des cadavres sur le site

4.6.1 Incinération

4.6.1.1 Définition

L'incinération fait référence à la combustion de matière, de sorte que les produits finaux résultants soient la chaleur, les émissions gazeuses et les cendres résiduelles. Il existe trois types d'incinération de cadavres d'animaux : (1) l'incinération en installation fixe, (2) l'incinération par rideau d'air et (3) l'incinération en plein air détaillées ci-dessous. La considération prédominante affectant l'utilisation de l'incinération à la ferme est d'ordre réglementaire. Dans certaines régions ou certains pays, la réglementation indique que l'équipement d'incinération doit contenir une chambre de combustion secondaire pour réduire les particules (c'est-à-dire les « cendres volantes ») et d'autres émissions, telles que les hydrocarbures polluants et les métaux lourds (Chen *et al.* 2004).

4.6.1.2 Modalités et contraintes

Les unités d'installations fixes vont des unités commerciales conçues pour l'incinération d'animaux à la ferme (pour la gestion des cadavres en cas de mortalité à des taux normaux à la ferme) aux grandes usines d'incinération. Elles sont normalement alimentées au diesel, au gaz naturel ou au propane. Les incinérateurs de bétail équipés de commandes thermostatiques et de chambres de combustion avec panneaux de réfraction permettent une utilisation réduite de carburant et une élimination plus efficace des cadavres. Certaines unités commerciales ont une capacité de plusieurs centaines de kilogrammes. Une observation périodique, un entretien de routine et un nettoyage des cendres sont nécessaires. La consommation de carburant varie selon la conception de l'incinérateur et le taux de chargement.

L'incinération à rideau d'air implique l'utilisation d'air forcé mécaniquement à travers un caisson à feu avec panneaux réfractaires ou une tranchée dans la terre. La technologie de rideaux d'air a été développée principalement comme moyen d'incinérer de grandes quantités de déchets combustibles résultant du défrichage ou d'un désastre naturel (Ellis 2001).

La caractéristique principale de l'incinération par rideau d'air est un « rideau » d'air à grande vitesse produit par un ventilateur au-dessus d'une chambre de combustion hors sol ou dans une tranchée de brûlage en terre (Figure 14). Le rideau d'air sert à contenir la fumée et les particules dans la zone de combustion et fournit un meilleur débit d'air et donc un meilleur apport en oxygène, permettant d'atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1 000°C, (Australia 2015)) et une combustion plus rapide et plus complète. Cette méthode a parfois été utilisée pour l'élimination de cadavres lors de l'épizootie de fièvre aphteuse de 2001 au Royaume-Uni (Scudamore *et al.* 2002) et pour l'élimination de volailles mortes en Virginie (É.U.) après une épizootie d'influenza aviaire en 2002 (Brglez 2003). Il s'agit d'un processus à forte demande de carburant (principalement du bois et du carburant diesel), mais son utilisation peut être justifiée afin d'éviter de déplacer des cadavres sur de longues distances (Ellis 2001).

Chaque type de combustible a des caractéristiques distinctes pouvant impacter son potentiel d'utilisation comme méthode d'élimination des cadavres.



Figure 14 : Principe de l'incinérateur à rideau d'air (source : airburners.com lien consulté le 13 avril 2021)

4.6.1.3 Risques sanitaires et environnementaux (avantages/inconvénients)

L'incinération en plein air n'est pas recommandée pour plusieurs raisons. Les inconvénients comprennent les besoins en main-d'œuvre et en carburant, la dépendance vis-à-vis de conditions météorologiques favorables, le potentiel de pollution de l'environnement, les odeurs et la perception négative du public. Ces facteurs ont mis fin à leur usage lors de l'épizootie de fièvre aphteuse de 2001 au Royaume-Uni (Scudamore *et al.* 2002).

Le processus d'incinération en plein air entraîne une turbulence de particules dans l'air sans permettre d'inactiver efficacement tous les agents pathogènes, qui sont susceptibles de se propager en aérosols. Si les paramètres d'incinération ne sont pas maîtrisés, ce processus peut également entraîner l'inhalation de produits chimiques dans l'air (notamment des dioxines), leur dépôt sur des cultures et vers les eaux de surface ou souterraines (L. Miller et Flory 2018; L.P. Miller, Milkis et Flory 2020).

En général, l'incinération complète détruit les bactéries et les virus, y compris les spores persistantes telles que celles de *B. anthracis*. Pendant l'épidémie de fièvre aphteuse de 2001 au Royaume-Uni, les autorités craignaient que le l'incinération en plein air de cadavres contaminés ne propage la maladie. L'hypothèse était que ce virus contenu dans les voies respiratoires d'un animal pouvait être expulsé pendant l'incinération et être viable au début du processus d'incinération. Mais aucune propagation de la fièvre aphteuse pendant cette épidémie n'a pu être attribuée à la diffusion du virus à partir des bûchers à ciel ouvert (Champion *et al.* 2002). Lors de foyers de fièvre aphteuse la même année aux Pays-Bas, l'incinération a été utilisée avec succès en combinaison avec l'équarrissage comme méthode d'élimination massive de cadavres (de Klerk 2002). Dans ce cas, un grand nombre de porcs et de bovins détruits dans le cadre du programme d'éradication ont d'abord été traités dans des usines d'équarrissage, et les farines de viande et d'os résultantes ont ensuite été incinérées dans une usine centrale.

Le Tableau 7 ci-dessous résume les principaux avantages et inconvénients de l'incinération en plein air.

Tableau 7 : Résumé des principaux avantages et inconvénients de l'incinération (en plein-air).

Source	Avantages	Inconvénients
FAO (2018) (L. Miller et Flory 2018)	Dans l'exploitation Inactive les agents pathogènes Réduit le volume	Risques en termes de biosécurité Non durable Opposition de la population La combustion incomplète ou à basse température peut ne pas inactiver efficacement tous les agents pathogènes Difficile à mettre en œuvre correctement Limitations réglementaires Lent Coût élevé Risque d'incendie (si en plein air, et en fonction des conditions météorologiques) Impact sur la qualité de l'air et odeurs
AUSVETPLAN (2015) (Australia 2015)	Ne nécessite pas de matériel sophistiqué Début de la mise en œuvre peut être rapide Méthode envisageable si des contraintes (terrain, niveau de nappe phréatique) excluent d'autres méthodes Inactivation d'agents pathogènes (à l'exception des prions) Ne nécessite un suivi qu'à court terme Peut être mise en œuvre sur toutes les espèces animales	Temps nécessaire pour l'installation des opérations et du chantier Quantités importantes de combustible solide Coût des combustibles élevé Durée nécessaire pour que l'ensemble des cadavres soient consumés Risque d'incendie à certaines périodes de l'année Perception du public Quantités importantes de cendres à gérer Effet à court terme sur la qualité de l'air (fumée, odeur) Impact des conditions climatiques sur l'efficacité de la combustion Nécessite une présence permanente pour le maintien de la combustion Accessibilité pour le matériel et les machines Risque environnemental (contamination de l'eau) si initiation de la combustion avec des combustibles liquides Emission de dioxine et polychlorobiphényles. Prévoir un suivi selon l'importance des opérations Manipulation des cadavres (pour les disposer)
USDA (2004) (Consortium 2004)	Pas d'attraction de charognards par rapport aux déchets produits (cendres) par l'incinération Destruction de la plupart des agents pathogènes (à l'exception des protéines prions)	Nécessite des ressources (matériels, personnels) potentiellement importante (ressource intensive) Contraintes réglementaires (les incinérations en plein-air ne sont pas autorisées dans tous les Etats mais il est possible d'obtenir des dérogations en cas d'urgence)

Source	Avantages	Inconvénients
	<p>Peut s'avérer peu coûteuse</p> <p><u>Spécifique à l'incinération à rideau d'air :</u> L'utilisation de l'incinération à rideau d'air permet d'accélérer la combustion et de raccourcir la durée des opérations et de réduire la quantité de combustible nécessaire. Permettrait aussi d'atteindre des températures plus élevées</p>	<p>Eloigner les opérations du public</p> <p>Faire attention au combustible utilisé (sec, ne pas brûler de bâche plastique avec les cadavres) pour éviter les fumées noires</p> <p>Risque d'incendie</p> <p>Quantité de cendres générées</p> <p>Contamination du sol ou de l'eau causée par les hydrocarbures utilisés comme combustible</p> <p>Impact des conditions climatiques sur la combustion</p> <p>La quantité de cadavres pouvant être traitée reste limitée (sauf en installation fixe) et est rarement compatible avec une gestion de situation de crise</p> <p>Nécessite du matériel spécifique (des dispositifs mobiles existent)</p> <p>Résultats variables selon la qualité et la conception du matériel utilisé</p>

4.6.2 Autres modalités

Les méthodes décrites ci-dessous ne sont pas actuellement réalisables sur un site d'élevage, il s'agit d'essais de laboratoire.

4.6.2.1 Hydrolyse alcaline

L'hydrolyse alcaline est un processus dans lequel des matières biologiques (i.e. protéines, acides nucléiques, glucides, lipides) sont converties en une solution aqueuse stérile composée de peptides, d'acides aminés, de sucres et de savons. Le processus repose généralement sur des hydroxydes de métaux alcalins tels que l'hydroxyde de sodium ou de potassium pour l'hydrolyse, et le processus peut être accéléré par l'application de chaleur (150°C) (Thacker 2004).

L'hydrolyse alcaline s'est avérée efficace pour détruire une large gamme d'agents potentiellement infectieux (Kaye *et al.* 1998). Le processus peut éliminer efficacement un cadavre en trois à huit heures (Thacker 2004). Bien que ce procédé soit très efficace pour détruire les agents pathogènes et produire une quantité limitée de déchets, il n'est pas pratique pour les grands volumes de mortalité à la ferme.

4.6.2.2 Digestion anaérobie

La digestion anaérobie implique la transformation de la matière organique par un écosystème bactérien de culture mixte sans oxygène (Erickson *et al.* 2004). La chaleur, le CO₂ et le méthane sont générés à partir de ce processus. La technologie de digestion anaérobie est compliquée et nécessite un investissement substantiel en équipement.

4.6.2.3 Gazéification

Des unités de gazéification commerciales ont été testées pour l'élimination du fumier et de cadavres de porcs (Van Kempen 2004). Le processus de gazéification pour l'élimination des cadavres présente des similitudes avec l'incinération, en ce que les cadavres sont réduits en cendres par un processus de brûlage confiné à haute température. Mais avec la technologie de gazéification, le matériau biologique chauffé à l'intérieur de la chambre génère du monoxyde de carbone et de l'hydrogène, ou « gaz de synthèse », qui à son tour alimente la combustion supplémentaire du matériau d'origine. Correctement exploité, le procédé est plus économe en carburant et produit moins d'émissions atmosphériques que l'incinération traditionnelle. L'adoption commerciale est cependant limitée en raison des coûts de démarrage élevés.

En Corée, un système de traitement thermochimique mécanisé a été développé pour traiter les cadavres et assainir les sites d'enfouissement du bétail. Les cadavres ont été traités par broyage, mélangés avec de la chaux vive et de la sciure de bois, et ont subi un traitement thermique (200-500°C). Le produit final a été testé comme engrais, mais a produit des résultats

inadéquats. Par conséquent, un cycle de compostage serait également nécessaire pour obtenir un engrais stable et utile (J.-I. Lee *et al.* 2021).

L'incinération correspond à la combustion des cadavres d'animaux, de sorte que les produits finaux qui en résultent soient la chaleur, les émissions gazeuses et les cendres résiduelles. Trois types d'incinération sont possibles : l'incinération en installation fixe, l'incinération par rideau d'air et l'incinération en plein air.

En général, l'incinération complète détruit les agents pathogènes (les bactéries et les virus, y compris les spores persistantes telles que celles de *B. anthracis*) à l'exception des prions. Les principaux inconvénients concernent l'incinération en plein air : nécessité de conditions météorologiques favorables, potentiel de pollution de l'environnement, mauvaises odeurs et perception négative du public.

Il existe d'autres techniques (hydrolyse alcaline, digestion anaérobie, gazéification) mais leur efficacité a été démontrée uniquement lors d'essais de laboratoire et ces méthodes ne sont pas réalisables sur le terrain actuellement.

4.7 Principes généraux d'organisation sur le site

4.7.1 L'anticipation, une étape indispensable

Comme évoqué précédemment, la méthode à privilégier reste toujours la prise en charge par l'équarrissage, il est toutefois nécessaire parfois de recourir aux autres méthodes présentées ci-avant, selon l'analyse de la situation.

Quelle que soit la (ou les) méthode(s) retenue(s), les modalités d'élimination (ou de traitement) des cadavres devront être précisées dans un arrêté préfectoral.

Dans tous les cas, il est essentiel de privilégier la rapidité d'intervention, car tout retard peut représenter un facteur supplémentaire de risque de diffusion d'agents pathogènes aux exploitations voisines (Hayama *et al.* 2015; Tao *et al.* 2021) et éventuellement à la faune sauvage environnante, et/ou engendrer la liquéfaction des cadavres. Il est donc nécessaire d'anticiper au maximum afin d'assurer la prise en charge des cadavres la plus rapide et efficace possible, particulièrement en situation de crise sanitaire. La pré-identification des sites constitue un pré-requis indispensable afin que cette étape ne devienne pas un point de blocage. Elle sera réalisée avec l'aide d'un hydrogéologue, sur la base de l'inventaire des possibilités d'enfouissement par département effectué préalablement, et consultation de l'Agence Régionale de Santé (ARS). Les moyens nécessaires aux travaux de terrassement ainsi que les conditions de survie et de dissémination d'un éventuel agent pathogène seront aussi à prendre en considération dès cette phase située en amont de la crise.

Certaines opérations peuvent nécessiter la mobilisation de moyens humains et matériels extérieurs à la DDETSP (Direction départementale de l'emploi, du travail, des solidarités et de la protection des populations). Par exemple, des pelleteuses seront nécessaires pour l'enfouissement, des dispositifs de lutte anti-incendie ou l'intervention des services de police ou de gendarmerie peuvent aussi être requis pour sécuriser la zone d'intervention, etc. Il

convient d'anticiper ces besoins en amont, et notamment d'identifier, avec l'aide du SIDPC de la Préfecture, et, dans le cadre de la préparation des PNISU, les partenaires éventuels, publics ou privés, à solliciter pour les sensibiliser à l'importance de leur rôle. La mise en place de conventions ou la passation de marchés peut être nécessaire.

L'ensemble des cas de figure devra avoir été envisagé et des protocoles devraient être pré-établis et disponibles. Dans le cas où les cadavres ne pourraient pas être éliminés rapidement, il est souhaitable à la fois de sécuriser leur accès, de les confiner, autant que possible, et de les protéger des regards en les couvrant ou en les maintenant dans les bâtiments afin de limiter :

- le risque de dissémination de tout agent pathogène ;
- le traumatisme psychologique de l'éleveur et des opérateurs (notamment en cas de dépeuplement) ;
- le risque d'afflux médiatique et de curieux.

Concernant le risque lié à la faune sauvage, il s'agira de sécuriser l'accès au cadavre, de le recouvrir ou de le disposer dans un contenant dédié (idéalement) et d'organiser le transport du cadavre vers une zone de stockage et de traitement. La nécessité de la réalisation d'un prélèvement sur place ou dans le lieu de dépôt devra être étudiée au cas par cas.

Le fait de transporter les cadavres représente également un risque de diffusion d'agents pathogènes. Ainsi, en cas de maladie due à certains dangers sanitaires (e.g. virus de la fièvre aphteuse), il peut être préférable de ne pas déplacer les cadavres et d'opter pour une méthode de gestion sur le site d'élevage. Par ailleurs, en cas d'urgence, les capacités de transport sont à prendre en considération : en effet, si elles sont dépassées, cela peut amener à choisir des options qui ne l'auraient pas été dans le cas contraire, ou tout simplement retarder les opérations, ce qui représente aussi un risque de propagation de maladies. Ainsi, il conviendrait d'avoir connaissance a priori des capacités de prise en charge et d'avoir identifié les situations pour lesquelles un transport est envisageable ou non.

4.7.2 Les risques pour les opérateurs et les mesures de biosécurité à mettre en œuvre

Que ce soit lors des manipulations sur site ou lors des transports, des risques sanitaires peuvent exister pour les opérateurs. Il faut alors garantir un processus de gestion des cadavres dans le respect des mesures de biosécurité et de protection des manipulateurs. Les autorités doivent informer les opérateurs sur les exigences de sécurité avec une utilisation appropriée des équipements de protection individuelle. Tout le personnel intervenant dans la gestion des cadavres doit respecter les procédures vis-à-vis des risques chimiques et biologiques (L.P. Miller, Milknis et Flory 2020), pour leur propre sécurité mais aussi pour minimiser les risques de diffusion des agents infectieux (cf. infra).

Des mesures sont à prendre en fonction des risques infectieux. Par exemple, étant donné le potentiel zoonotique des virus Influenza (épizootie d'Influenza aviaire H7N7 en Belgique en 2003), les mesures de protection comprenaient des vêtements (combinaison, masque, gants et lunettes), la prise de médicaments antiviraux contre l'IA et la vaccination avec le virus de la grippe humaine pour prévenir tout risque de réassortiment (Van den Berg et Houdart 2008).

Lorsque des substances biocides sont utilisées, des précautions d'emploi et de protection adaptées doivent être respectées. La manipulation de chaux ou de cadavres traités avec de la chaux implique le respect de mesures de sécurité liées à la réaction exothermique engendrée. Des précautions sont également à prendre lors de la mise en place du stockage par préservation acide, nécessitant l'emploi d'acides inorganiques tels que l'acide sulfurique ou l'acide phosphorique.

Enfin, lors des opérations de gestion des cadavres, des mesures de biosécurité doivent être mises en œuvre afin d'éviter toute dissémination d'agents pathogènes aux élevages et autres animaux et/ou êtres humains à proximité. Ces mesures de biosécurité comprennent notamment une protection et une délimitation du site, la protection des personnes par des tenues spécifiques (cottes, charlottes, pédisacs, gants, etc.), l'utilisation de matériel ou véhicule rigoureusement nettoyés et désinfectés après l'opération. Par ailleurs, en cas de mortalités associées à des agents infectieux spécifiques (virus de la fièvre aphteuse, virus de la PPA, *Clostridium botulinum*), des précautions particulières liées aux propriétés de résistance et de dissémination de ces agents seront à considérer selon les recommandations spécifiques en cas de maladies réglementées.

4.7.3 Points d'attention après la mise en place des opérations de gestion des cadavres

4.7.3.1 Les risques chimiques liés à l'enfouissement des cadavres

Des molécules thérapeutiques ou préventives d'affections et des molécules non thérapeutiques peuvent être présentes dans les cadavres et diffuser lors de leur décomposition dans le sol, voire contaminer des nappes phréatiques (H.-s. Kim et Kim 2012; Q. Yuan, Snow et Bartelt-Hunt 2013a). Ces molécules, comprenant essentiellement les antibiotiques, les antiparasitaires (dont les anticoccidiens chez les volailles) ou les antifongiques (Chowdhury *et al.* 2019) sont à l'origine de différents risques, aussi bien pour le sol que pour les plantes ou les manipulateurs de cadavres. Cependant, peu d'informations sont disponibles dans la littérature concernant ces risques véhiculés par les cadavres. Les études disponibles sur la présence de ces produits dans les cadavres des animaux et au niveau des fosses d'enfouissement concernent essentiellement les antibiotiques.

Les risques associés aux antibiotiques sont liés à la toxicité propre des molécules, pour les plantes par exemple. Ces risques sont aussi liés à leur effet sur l'environnement, en entraînant la sélection de germes résistants dans l'environnement à partir des lixiviats contaminés ainsi que la libération de gènes de résistance pouvant être transférés aux bactéries environnementales. La présence d'antibiotiques dans des lixiviats et les sols adjacents (Q. Yuan, Snow et Bartelt-Hunt 2013a) peut ainsi constituer une menace potentielle pour la qualité des eaux souterraines. Plusieurs études en Afrique du Sud ont démontré la présence de produits pharmaceutiques, de bactéries résistantes aux antibiotiques et de leurs gènes de résistance dans les milieux environnant les cimetières, y compris les eaux souterraines (Gwenzi 2020). La notion de thanato-résistome est ainsi apparue, qui se réfère à la collection complète de toutes les bactéries résistantes aux antibiotiques et de leurs gènes de résistance, ainsi qu'aux éléments génétiques mobiles associés dans les cadavres humains, leurs environnements proches et les milieux touchés par ces cadavres (Gwenzi 2020).

Cette toxicité directe ou indirecte est en partie dépendante de la biodisponibilité de ces molécules. Une fois dans le sol, la mobilité et la biodisponibilité des antibiotiques dépendent de leurs propriétés physico-chimiques et seront influencées par les caractéristiques du sol (pH, type de sol, etc.) (Gaballah *et al.* 2021). La biodisponibilité dépend aussi de la fixation des molécules sur les particules de boues consécutives à la pluie sur le sol (Puckowski *et al.* 2016). Enfin, des facteurs météorologiques (i.e. saisonnalité, plages de température, etc.) sont également connus pour influencer ces paramètres (Gaballah *et al.* 2021). La persistance des antibiotiques dans le sol, par exemple, augmente avec la baisse des températures, mais peut aussi être liée aux activités des micro-organismes du sol capables de les dégrader (Rocha *et al.* 2021). Des antibiotiques tels que la norfloxacin et la tétracycline peuvent persister longtemps à la surface du sol, contrairement à la sulfaméthazine et à l'érythromycine qui ont tendance à atteindre des couches plus profondes du sol et des eaux souterraines. La biotransformation et la dégradation complètes des antimicrobiens peut nécessiter jusqu'à 150 jours dans le fumier (Zalewska *et al.* 2021). La biodégradation est plus rapide pour les macrolides et les sulfonamides, plus lente pour les tétracyclines, et variable pour les fluoroquinolones. Le groupe des cyclines se dégrade facilement à un niveau élevé de température à l'exception de la doxycycline qui est dégradée à un faible niveau de température (Gaballah *et al.* 2021).

Concernant les anticoccidiens (souvent des antibiotiques ionophores), la durée de vie est selon certaines études relativement courte : pour le lasalocid la demi-vie dans le sol est d'environ 3,1 jours. Néanmoins cette demi-vie est plus liée à la dilution de la molécule dans le sol qu'à sa biotransformation (Žižek *et al.* 2015). Et, selon des publications de l'EFSA, cet anticoccidien est toxique pour les plantes, les vers de terre et leur reproduction (EFSA 2010).

Concernant les anthelminthiques et autres antiparasitaires, la toxicité concerne, outre le manipulateur, la micro et macrofaune du sol. Des études écotoxicologiques ont montré que divers groupes d'antiparasitaires peuvent avoir un impact négatif sur les collemboles (comme *Folsomia candida*), y compris les pyréthroïdes, les salicylanilides, les phénylépyrazoles et les lactones macrocycliques (Serafini *et al.* 2019). Parmi les avermectines, l'eprinomectine est plus hydrophile que l'ivermectine ou l'abamectine. Dans le sol, elle est modérément à très persistante, selon le type de sol et les conditions environnementales et persiste pendant 38 à 53 jours dans des conditions aérobies, 691-1 491 jours dans des conditions anaérobies, et 333 jours dans le fumier de bovins.

Une bioaccumulation peut amplifier les risques toxiques liées à ces molécules. Elle peut survenir dans les plantes ou des organismes du sol (Puckowski *et al.* 2016). Mais la possibilité de bioaccumulation dans des animaux avant qu'ils ne meurent est connue. Ce phénomène de bioaccumulation des antibiotiques est par exemple bien connu chez les poissons (Puckowski *et al.* 2016).

Il faut toutefois noter que si l'introduction d'antibiotiques dans le sol *via* l'enfouissement de cadavres d'animaux récemment traités est à considérer, son importance relative par rapport à d'autres pratiques, par exemple l'épandage des effluents d'élevage (fumiers, lisiers) est probablement faible.

4.7.3.2 La traçabilité des sites d'enfouissement

Le suivi dans le temps (traçabilité) des sites d'enfouissement constitue un enjeu majeur. Du fait même de sa nature, l'enfouissement laisse peu de traces visibles dès lors que la végétation

a repoussé. Ce recouvrement végétal peut même être accéléré par l'enrichissement des sols en matière organique. À plus long terme, la traçabilité paraît aussi nécessaire pour toute activité nécessitant de creuser dans le sol : aménagements, construction de nouveaux bâtiments, etc.

Il apparaît donc impératif de maintenir non seulement une traçabilité dans le temps des sites d'enfouissement, mais également de signaler très clairement par un affichage bien visible sur site d'éventuelles restrictions d'accès pour raisons sanitaires.

4.7.4 Synthèse sur les modalités de gestion des cadavres

Le Tableau 8 ci-dessous fait la synthèse des différentes méthodes de stockage temporaire ou de gestion envisagées par le GT.

Les expériences passées lors d'épizooties en Europe indiquent que l'utilisation de plusieurs méthodes de gestion en combinaison peut être nécessaire afin d'éliminer un grand nombre de cadavres en temps de crise.

Le document complémentaire demandé par la DGAL (voir le paragraphe sur les questions de la saisine 1.2) viendra compléter ce tableau de synthèse.

Tableau 8: Synthèse sur les différentes méthodes de stockage temporaire ou de gestion envisagées

Méthode	Logistique					Impact sanitaire et environnemental (risques biologiques)	
	Nécessite transport	Délai préconisé pour transport des cadavres en dehors du site	Technicité des opérateurs	Disponibilité du matériel nécessaire	Besoins d'anticipation préalable	Inactivation pathogènes (2)	Dissémination agents biologiques (résultant de la modalité, transport exclu)
Stockage au sol	Oui à terme	Quasi-immédiat	Pas de technicité particulière requise	Matériel nécessaire facilement accessible (conteneurs, chariots, bennes...) sauf peut-être en cas de crise (bennes)	Oui : réflexion sur le lieu, les procédures, quantités maximales, disposer des matériels nécessaires	-	+++ (via insectes, charognards, écoulement lixiviats...)
Stockage réfrigéré (froid positif)	Oui à terme	Délai de l'ordre de quelques jours	Pas de technicité particulière requise	Nécessite installation de chambres froides (volume déterminant les capacités de stockage) Nécessite disponibilité camions pour collecte	Oui : l'équipement doit être installé et fonctionnel (de plus, connaissance des capacités de stockage sur site serait utile)	-	-
Stockage réfrigéré (froid négatif)	Oui à terme	Délai de l'ordre de quelques semaines (jusqu'à 2 mois)	Pas de technicité particulière requise	Nécessite installation d'équipement de congélation (volume déterminant les capacités de stockage) Nécessite disponibilité camions pour collecte	Oui : l'équipement doit être installé et fonctionnel (de plus, connaissance des capacités de stockage sur site serait utile)	-	-
Equarrissage	Oui	Quasi-immédiat	Personnels déjà formés et opérationnels	Nécessite disponibilité camions pour collecte	Oui pour estimation des quantités pouvant être traitées Procédures à réfléchir en amont	+++	-
Enfouissement en « CSDU »	Oui	Quasi-immédiat	Personnels déjà formés et opérationnels	Nécessite disponibilité camions pour collecte Une fois sur site « CSDU », matériel disponible	Oui pour estimation des quantités pouvant être traitées Procédures à réfléchir en amont	+	+/- (écoulements lixiviats mais récupérés par structure)
Enfouissement sur l'exploitation	Non (1)	Sans objet	Technicité faible (manipulation matériel « courant », présent sur l'exploitation)	Matériel « courant » normalement facilement disponible (mais à vérifier)	Oui (rapport départemental par des hydrogéologues, réflexion sur site d'élevage serait un plus) A l'échelle du département (pas de l'élevage) : procédures à réfléchir en amont (+ exercices)	+	+ (si enfouissement insuffisant, accessibilité aux charognards et écoulements lixiviats)

Méthode	Logistique					Impact sanitaire et environnemental (risques biologiques)	
	Nécessite transport	Délai préconisé pour transport des cadavres en dehors du site	Technicité des opérateurs	Disponibilité du matériel nécessaire	Besoins d'anticipation préalable	Inactivation pathogènes (2)	Dissémination agents biologiques (résultant de la modalité, transport exclu)
Enfouissement sur site dédié	Oui	Quasi-immédiat	Technicité modérée : manipulation matériel « courant » mais importance du site nécessite une gestion des opérations Intervention équipe BRGM indispensable pour détermination du site	Selon taille, à évaluer et estimer	Oui rapport départemental par des hydrogéologues indispensable Procédures à réfléchir en amont (+ exercices)	+	+ (écoulements lixiviats)
Incinération sur site (en plein air)	Non (1)	Sans objet	Technicité importante : manipulation matériel « courant », présent sur l'exploitation, connaissances pour la bonne conduite des opérations, manipulation et utilisation combustible	Matériel pour creuser les fosses aisément disponible (mais à estimer et vérifier selon situation rencontrée) Combustible	Oui, à l'échelle du département (pas de l'élevage) : procédures à réfléchir en amont (+ exercices) Identification des stocks disponibles et mobilisables (combustibles...)	++ voire +++	+ (selon rapidité de mise en œuvre des opérations permettant ou non écoulement de lixiviats, accès aux charognards...)
Incinération rideau d'air	Non (1)	Sans objet	Technicité importante : manipulation matériel spécifique et connaissances pour la bonne conduite des opérations	Matériel spécifique dont la disponibilité en France n'est pas connue	A l'échelle du département (pas de l'élevage) : procédures à réfléchir en amont (+ exercices) Identification des stocks disponibles et mobilisables (incinérateurs)	++ voire +++	-
Compostage sur site	Non (1)	Sans objet	Technicité importante : manipulation matériel spécifique et connaissances pour la bonne conduite des opérations	Matériel courant normalement disponible sur le site Matériaux de couverture ? (comme non pratiqué en Europe, pas d'information sur disponibilité ou non de ces matériaux)	Oui, à l'échelle du département (pas de l'élevage) : procédures à réfléchir en amont (+ exercices) Identification des stocks disponibles et mobilisables	+	+ (lixiviats si mauvaise conduite du compostage, accès aux charognards si opérations pas assez rapidement mises en œuvre...)
Recouvrement en surface	Non (1)	Sans objet	peu de recul sur la méthode	Matériel ne semble pas particulièrement limitant (mais peu de recul) Se rapproche de compostage	Oui, à l'échelle du département (pas de l'élevage) : procédures à réfléchir en amont (+ exercices) Identification des stocks disponibles et mobilisables	?	+ (lixiviats si mauvaise conduite du compostage, accès aux charognards si opérations pas assez rapidement mises en œuvre...)

(1) Des déplacements de cadavres sur le site lui-même peuvent être nécessaires

(2) Echelle utilisée : - pas d'action sur les pathogènes ; + : inactivation de pathogènes tels que virus et bactéries sans capacité de résistance particulière ; ++ inactivation de formes de résistance comme les spores ; +++ inactivation de prions. (NB : quelle que soit la méthode, l'efficacité théorique maximale peut être impactée si du matériel inadéquat est utilisé, ou en cas de technicité insuffisante...)

5 Incertitudes

Les incertitudes, au regard des réponses aux questions posées dans la saisine, sont essentiellement liées au manque de données et ceci pour la majorité des parties du rapport (dégradation des cadavres et évolution microbiologique, description des modalités de gestion des cadavres, contraintes et risques associés, effets de la chaux).

Une incertitude globale existe en raison du manque de données scientifiques ou techniques portant sur des volumes importants de cadavres et des traitements à grande échelle. En effet, les données obtenues en laboratoire ou à l'échelle d'un/quelques cadavres peuvent difficilement être extrapolées de manière fiable à des phénomènes de masse impliquant plusieurs tonnes de cadavres. De plus, les études sur le porc, les plus nombreuses, n'ont pas été conduites avec l'objectif de répondre aux questions de la saisine, mais pour être utilisables en criminologie et le porc est utilisé du fait des similitudes avec les cadavres humains. De ce fait, les informations qu'elles apportent ne sont que parcellaires. Il y a très peu de données et très peu de retours d'expérience disponibles sur l'enfouissement de grandes quantités de cadavres en profondeur et l'effet des interactions possibles entre ces cadavres. Les données sont également manquantes sur les effets sur l'écosystème lors d'enfouissement massif de cadavres.

Concernant les modalités de gestion autres que l'enfouissement en profondeur (recouvrement en surface, incinération par rideau d'air, etc.), très peu de données sont disponibles. Pour le stockage temporaire en surface, il n'y a pas de données disponibles et pas de retour d'expérience précis et détaillé. Le compostage des cadavres de porcs et de volailles est la modalité de gestion pour laquelle le corpus bibliographique ainsi que les retours d'expérience sont les plus nombreux et donc l'incertitude sur l'efficacité de ce procédé est la plus faible.

Pour les facteurs influençant la décomposition des cadavres, il manque des études sur l'impact des intrants sur la décomposition des cadavres (antibiotiques, insecticides, etc.) et les interactions des différents facteurs sur la cinétique de décomposition (en général les facteurs sont étudiés isolément).

Enfin, en ce qui concerne l'effet de la chaux, il n'y a pas de références scientifiques pour valider les doses préconisées dans de nombreux rapports et publications et une fois encore, il existe très peu d'études sur cadavres entiers et lors d'enfouissement en grandes quantités. Il en résulte une incertitude importante sur l'efficacité de la chaux pour réduire la pression infectieuse en cas d'utilisation sur cadavres entiers mais également sur l'évolution *post mortem* des cadavres.

6 Conclusions, réponses aux questions de la saisine et recommandations

6.1 Conclusions et réponses aux questions de la saisine

➤ Cinétique de décomposition des cadavres

La plupart des études identifiées dans la recherche bibliographique ont été menées afin de répondre à des objectifs ne relevant pas directement du champ couvert par les questions de la saisine. Aussi, les éléments de réponse quant au processus de décomposition des cadavres d'animaux et à l'impact de différents facteurs sur celui-ci restent-ils parcellaires. Pour autant, certains éléments peuvent être soulignés.

La décomposition est un processus complexe reposant en grande partie sur l'activité de microorganismes et dépend de nombreux facteurs, notamment les facteurs exogènes. Ainsi, l'accessibilité des charognards ou des insectes nécrophages au cadavre, la température, l'humidité, la présence d'oxygène, ou encore le pH ont un effet majeur sur le processus de décomposition. Dans certaines conditions d'enfouissement avec de faibles niveaux d'oxygène, un arrêt du processus de décomposition peut être observé et, si l'humidité est suffisante, la formation d'adipocire. Les facteurs endogènes (taille du cadavre, statut physiologique, espèce animale) ont aussi un effet mais celui-ci paraît négligeable par rapport aux facteurs exogènes mentionnés auparavant. Des petits cadavres se décomposent plus rapidement que ceux des grands animaux, ce qui correspond aux observations de terrain (dégradation rapide des cadavres de volailles ou de poissons par rapport aux cadavres de bovins) mais cette cinétique reste difficilement quantifiable. En effet, l'impact de la taille ou de la masse individuelle des cadavres sur le taux de décomposition a été étudiée par un certain nombre d'équipes, avec des effets parfois contradictoires observés, certains auteurs indiquant que les cadavres de petite taille étaient décomposés plus rapidement tandis que d'autres démontrent l'inverse. L'impact de la taille individuelle n'est donc pas clair, sans doute du fait des interrelations existantes avec d'autres facteurs.

Les retours d'expérience sur des enfouissements de masse indiquent que l'accumulation d'un nombre élevé de cadavres enfouis en profondeur semble induire des conditions défavorables à la décomposition, et augmenterait le temps nécessaire à son achèvement mais il est difficile de préciser l'impact du seul paramètre quantité de cadavres car l'accumulation de ceux-ci modifie les facteurs exogènes : la disponibilité en oxygène sera limitée par le tassement par exemple.

Le microbiome présent du vivant de l'animal évolue après la mort vers le nécrobiome, du fait des phénomènes de translocation et de l'interaction avec les êtres vivants du sol. Ce nécrobiome évolue ensuite tout au long du processus de décomposition. Les taxons se succèdent au cours du temps selon les nutriments disponibles, la nature du sol, l'environnement du cadavre (eau, terre, etc.) ou d'autres paramètres physico-chimiques (humidité, température, pH). Les changements dans la composition de la communauté microbienne varient selon les études, dont les résultats semblent parfois contradictoires.

Les agents pathogènes ne peuvent en général plus se multiplier dans les cadavres et leur quantité diminue au cours du temps du fait de phénomènes de compétition pour les ressources nutritionnelles, de la modification du milieu ou encore de la synthèse de substances néfastes

pour leur survie par certaines espèces présentes dans le nécrobiome. Ainsi, quelle que soit l'espèce animale, les agents infectieux ne présentant pas de forme de résistance particulière (spores, protéines prions) disparaissent au cours du processus de décomposition en un temps variable selon les conditions. Certains agents présentant des formes de résistance particulièrement élevée dans le milieu extérieur peuvent néanmoins ne pas être éliminés au cours du processus de décomposition et persister dans l'environnement. En cas de mortalité liée à des agents pathogènes particulièrement résistants ou diffusibles, ou de possibilité d'un portage asymptomatique d'agents bactériens qui pourraient sporuler, il convient de prendre en considération les propriétés de ces agents afin d'évaluer au cas par cas la survie et la durée de persistance de ces agents dans les cadavres et leur environnement.

➤ **Stockage temporaire en surface des cadavres**

Le stockage de cadavres d'animaux à l'air libre est une pratique qui n'est *a priori* observée que sur les sites d'élevage. En effet, que ce soit en « CSDU », ou encore en usine d'équarrissage, aucun stockage temporaire en surface n'est effectué.

Des cadavres laissés en libre accès dans l'environnement constituent une source attractive de nourriture pour certaines espèces d'insectes ou de vertébrés nécrophages (dont des mammifères carnivores ou des oiseaux) qui chercheront rapidement à accéder aux cadavres. Les mouches sont par exemple capables de localiser un cadavre en quelques minutes et peuvent se déplacer sur plusieurs kilomètres pour y accéder. Leur comportement ubiquiste et leur très grande capacité de dispersion en font des vecteurs passifs potentiels d'agents infectieux qui pourraient être présents sur un cadavre.

De plus, les nécrophages participent à la décomposition des cadavres et accélèrent le processus de décomposition, ce qui aura pour effet :

- d'impacter les opérations de collecte et de transformation des cadavres à l'usine d'équarrissage. Si les cadavres sont trop liquéfiés, les capacités de traitement seront ralenties, voire complètement arrêtées. Il peut alors être préférable de ne pas collecter ces cadavres ou de les acheminer directement en « CSDU »;
- de favoriser et accélérer les écoulements de lixiviats dans l'environnement proche *via* les brèches formées par les nécrophages.

En outre, ces espèces nécrophages s'exposeront aux différents microorganismes présents dans les cadavres, dont certains sont susceptibles d'être néfastes pour leur santé, et ce, même si la mortalité massive n'est pas liée à une cause sanitaire (des microorganismes peuvent avoir des relations de mutualisme ou de commensalisme avec certaines espèces mais être pathogènes pour d'autres).

Sur le terrain, il est observé que les cadavres d'espèces de petite taille (volailles, poissons) se décomposent plus rapidement que les cadavres d'animaux de grande taille. Une particularité des piscicultures en eau douce mérite d'être abordée : en cas de mortalité importante dans un bassin ou un élevage (e.g. suite à une pollution, baisse du niveau d'eau ou bien un orage, la foudre pouvant frapper à proximité des bassins et tuer de nombreux animaux), les poissons commencent à se décomposer dans le bassin. Des contaminations des cours d'eau peuvent alors avoir lieu si les animaux ne sont pas éliminés rapidement. Il pourrait être pertinent de prendre en compte ce risque de déversement dans les cours d'eau (liés à la structure du site et de l'implantation des bassins), dans la priorisation des collectes à effectuer en cas de crise affectant plusieurs espèces animales.

Si une cause infectieuse est suspectée ou identifiée, il conviendra de prendre en compte les caractéristiques de l'agent incriminé (capacités de résistance, doses infectieuses, voies de transmission, etc.) pour évaluer la persistance et le risque de propagation à partir des cadavres stockés en surface. En outre, il convient notamment d'évaluer le risque de contamination croisée et de diffusion d'agents pathogènes à d'autres productions animales sur le site *via* les dispersions par aérosol, par écoulement, par des animaux nécrophages ou encore par des supports contaminés comme les bottes ou du matériel).

Pour toutes ces raisons, les experts du GT recommandent de ne pas recourir au stockage en surface de cadavres, en particulier pour les espèces à décomposition rapide (volailles, poissons). D'autres méthodes, comme le stockage sous régime du froid (positif ou négatif), sont à encourager ou bien à développer pour éviter de stocker les cadavres à l'air libre.

Pour autant, si cette pratique devait être mise en œuvre (notamment pour les bovins, ou porcins de grande taille), les experts suggèrent de prendre en compte les éléments suivants :

- quelle que soit la situation, ce stockage devrait toujours être effectué sur la période la plus courte possible et pas au-delà de 48 heures. Si les cadavres atteignent un état de décomposition avancée, ils posent problème à plus d'un titre : contamination locale *via* les lixiviats produits, collecte plus difficile (possibilité de désolidarisation du cadavre de la grue mécanique) et risque de ralentissement ou de blocage du processus de transformation à l'usine d'équarrissage ;
- au niveau des élevages, il serait souhaitable de penser à l'avance au lieu de stockage le plus adapté pour limiter au maximum les risques sanitaires et environnementaux. Une attention particulière sera portée sur les possibilités de nettoyage et de désinfection du lieu de stockage et du matériel, la gestion des contaminations croisées avec d'autres productions animales, et la protection vis-à-vis des contacts avec les autres animaux domestiques ou sauvages ;
- le stockage en bâtiment ou dans un local clos peut-être envisagé afin de limiter l'accès aux espèces nécrophages ou autres animaux de l'exploitation (chiens par exemple), la transmission d'agents infectieux à transmission aérienne, et l'exposition à des températures élevées qui risqueraient d'accélérer le processus de décomposition des cadavres. Il est rappelé que ce stockage, même en bâtiment, doit être le plus court possible afin que les composés organiques volatils n'aient pas le temps de se former et de s'accumuler (ce qui pourrait entraîner des nuisances olfactives, mais aussi la formation de gaz irritants voire toxiques). Sur le continent nord-américain, le stockage de cadavres en bâtiments est une pratique courante et constitue même parfois une première étape de compostage. Il pourrait être envisagé de recourir à une pratique de maturation aérobie analogue avant que les cadavres soient collectés pour un envoi en usine d'équarrissage (en particulier dans un contexte sanitaire favorable) ;
- déposer les cadavres sur une bâche ou sur une couche de paille ou de végétaux humides et les recouvrir avec de la paille ou des végétaux humides afin de limiter la contamination du sol par les lixiviats et de limiter l'aérosolisation de certains agents pouvant être transmis par voie aérienne. En outre, l'utilisation de paille ou de végétaux humidifiés permettrait de ralentir le processus de décomposition et par voie de conséquence, de réduire les quantités de lixiviats produites. Recouvrir le cadavre d'une bâche ou d'une cloche peut s'avérer délétère si les températures extérieures sont élevées (les cadavres atteignant plus rapidement un état de décomposition avancée). De manière générale, les systèmes utilisés pour limiter l'accès aux autres espèces

animales devraient être choisis de façon à ne pas accélérer le processus de décomposition ;

- les cadavres de petite taille peuvent être stockés dans des bacs ou des containers fermés ;
- les matériels ou surfaces ayant été en contact avec les cadavres doivent faire l'objet d'un nettoyage et d'une désinfection dont le protocole doit être adapté à la situation, c'est-à-dire selon qu'une cause infectieuse a été identifiée, ou non. La chaux pourrait être considérée (au même titre que d'autres substances à activité biocide) pour cet usage. De plus, des mesures de biosécurité doivent être appliquées pour éviter la diffusion d'un agent pathogène tant vers l'être humain que vers les animaux ;
- sensibiliser les éleveurs aux risques liés à cette pratique qui n'est pas recommandée au-delà de 48 heures.

Des systèmes permettant de stocker temporairement les cadavres sous couvert du froid (chambres froides positives ou négatives, congélateurs) sont à privilégier. Un certain nombre d'élevages (volailles, aquacoles, porcins) sont d'ores et déjà équipés mais cette pratique est à encourager de façon à ce que plus d'élevages le soient, et que les capacités de stockage soient augmentées et améliorées. Ces dispositifs sont toutefois de capacité limitée (quelques pourcents des capacités d'élevage du site) et ne peuvent donc à eux seuls résoudre la gestion des grandes quantités de cadavres en élevage. Pour autant, ces équipements peuvent permettre de limiter la saturation des capacités de collecte et de traitement des cadavres, puisque l'enlèvement des cadavres pourrait être différé (de l'ordre de quelques jours à quelques semaines selon les dispositifs et selon la situation).

➤ **Enfouissement définitif sur sites dédiés et « CSDU »**

L'enfouissement définitif en « CSDU » ou dans des sites dédiés (sur l'exploitation ou en terrain communal) peut être envisagé (après autorisation des services de l'Etat en charge de l'environnement) en cas de saturation des usines d'équarrissage, et éventuellement de saturation des moyens de transport, que la mortalité résulte d'un processus infectieux ou non.

Pour autant, si les mortalités résultaient d'un processus infectieux identifié, il conviendra de prendre en compte les risques de transmission de l'agent pathogène incriminé si les cadavres font l'objet d'un transport. Les véhicules doivent être étanches, et le protocole de nettoyage et désinfection de même que les règles de biosécurité doivent être adaptés (équipements de protection individuels, etc.), et rigoureusement respectés par les opérateurs. Cet élément est à prendre en compte non seulement en cas de transport en dehors du site d'élevage, mais aussi pour les matériels et véhicules ayant servi à transporter et enfouir les animaux sur le site d'élevage, ainsi que pour les manipulateurs.

Suite à l'enfouissement, les cadavres entrent dans un processus de décomposition qui génère des lixiviats ainsi que des gaz susceptibles de faire remonter les cadavres à la surface. Percer les cadavres avant enfouissement permet à ces fluides et gaz de s'échapper plus aisément et d'éviter ce phénomène. Cependant, le perçage des cadavres doit être évalué en fonction du risque sanitaire lié à cette action : risque de diffusion des éventuels pathogènes, risques liés à la biosécurité, risques pour les travailleurs, etc.

La plus grande difficulté consiste à identifier un site qui soit adapté pour permettre au processus de décomposition de se mettre en place et donc, à terme, d'éliminer les cadavres, tout en limitant les risques de contamination de l'environnement, et notamment des eaux (de

surface ou souterraines) par les lixiviats. Des réflexions peuvent être engagées à l'échelle d'un territoire (département par exemple) pour identifier les sites susceptibles d'être envisagés pour enfouir des cadavres d'animaux. Il est ensuite nécessaire de faire intervenir un hydrogéologue afin qu'il détermine si le site d'enfouissement envisagé est adéquat et qu'il définisse précisément celui-ci sur la base de différents critères (nature des sols, perméabilité, distances par rapport aux cours d'eau, à la nappe phréatique, pente).

Si le site est correctement choisi, les risques concernant la diffusion d'agents potentiellement pathogènes à partir des cadavres en décomposition apparaissent négligeables. Certains agents présentant des capacités de résistance élevées (spores, protéines prions) peuvent néanmoins persister au niveau du site d'enfouissement pendant de longues périodes. Il existe alors un risque de résurgence au niveau local (exemple des spores de *Bacillus anthracis* et des « champs maudits » ou de botulisme avec persistance des spores de *Clostridium botulinum* dans l'environnement) mais aussi un risque de diffusion à plus ou moins grande distance dû aux ruissellements (variables selon les conditions climatiques, la topographie) ou à d'autres véhicules de dispersion (rôle potentiel d'espèces animales). L'enfouissement est à éviter dans ces situations de mortalité due à des agents pathogènes résistants.

Il est à noter que les risques sanitaires et environnementaux semblent plus maîtrisables en cas d'enfouissement en « CSDU » qu'en cas d'enfouissement sur l'exploitation ou sur un site dédié du fait des procédures d'analyse et de traitement des lixiviats mises en place dans ces structures. En cas d'enfouissement sur des sites dédiés, disposer d'une étude globale à l'échelle du territoire (e.g. département) et de la pré-identification de sites précis permettrait de gagner du temps pour la gestion de la crise, et de réduire les risques liés à l'enfouissement de cadavres. Un suivi des sites sera à prévoir afin de connaître l'impact de l'enfouissement et de vérifier l'absence de contamination (modifications physico-chimiques, microorganismes indicateurs de contamination, et éventuellement agents infectieux précis si nécessaire).

Le recouvrement en surface constitue une modalité particulière d'enfouissement faisant l'objet d'investigations depuis peu de temps. Le manque de recul et d'informations quant à la quantité de cadavres pouvant être pris en charge, les effets potentiels sur les agents pathogènes, les risques sanitaires et environnementaux potentiels, ne permettent pas aux membres du GT de recommander le recours à cette modalité de gestion. Elle semble néanmoins pouvoir s'avérer utile, au moins pour un nombre limité de cadavres, et des études complémentaires permettraient de préciser si elle peut être envisagée soit comme modalité de gestion définitive (en élevage ou bien pour les cadavres d'animaux de la faune sauvage), soit comme une étape de pré-traitement (avant de prendre en charge les cadavres d'une autre manière).

➤ Ajout de chaux pour le stockage ou l'enfouissement des cadavres

Une recherche et une analyse exhaustive de la littérature disponible concernant l'utilisation de la chaux ont été réalisées afin de rassembler le plus d'informations possibles par rapport à l'effet de la chaux sur la décomposition des cadavres, son effet biocide sur les microorganismes et éventuellement de préciser les conditions d'utilisation.

L'effet biocide de la chaux (vive comme éteinte) a été démontré sur divers matériels ou surfaces mais pas sur des cadavres. Il n'est ainsi pas possible de conclure quant à l'inactivation des agents infectieux associés à des cadavres après application de chaux, qu'ils soient stockés à l'air libre ou enfouis. Un effet sur la flore microbiologique en surface du cadavre est probable, en particulier sur les agents sensibles à des pH élevés et/ou à la chaleur

(cas de la chaux vive) mais l'impact sur les agents situés à l'intérieur des cadavres est inconnu. Certaines études ont même indiqué des effets délétères par rapport à certains agents infectieux (*Bacillus anthracis*).

Le traitement des cadavres à la chaux a un impact sur le processus de décomposition lui-même. Appliquée sur des cadavres, elle a parfois été décrite comme un facteur d'accélération de la décomposition, en particulier en conditions aérobies (or, il est rappelé qu'en cas de stockage en surface, il est préférable de ne pas accélérer le processus de décomposition pour faciliter la mise en place des mesures de gestion ultérieures). En cas d'enfouissement, les études semblent au contraire indiquer que le processus de décomposition serait ralenti suite à l'application de chaux (vive comme éteinte).

Les recommandations existantes dans la littérature et dans les rapports émanant des autorités sanitaires, quant à l'utilisation de chaux, et aux conditions d'usage, sont variables et parfois contradictoires. En réalité, les situations dans lesquelles le recours à la chaux serait nécessaire, ainsi que les conditions d'utilisation précises, ne sont actuellement pas clairement identifiées. Des recherches visant à identifier ces situations, à préciser les conditions d'utilisation de la chaux, et à évaluer son impact environnemental sont nécessaires pour apporter des éléments de réponse concrets par rapport à ce point.

Les experts ne recommandent pas l'application de chaux de façon systématique sur des cadavres, quelle que soit la méthode de gestion de ceux-ci (stockage en surface comme enfouissement) et quelle que soit la cause des mortalités. De plus, les experts rappellent que l'application de chaux sur les cadavres peut bloquer le processus des usines d'équarrissage.

6.2 Recommandations

Suite aux réponses aux questions de la saisine, les experts souhaitent formuler plusieurs recommandations (sans hiérarchisation).

➤ Recommandations d'études et de recherches

Très peu de données sont disponibles, notamment sur les enfouissements à grande échelle, il apparaît donc nécessaire d'entreprendre des recherches ciblées sur la dégradation et la gestion des cadavres d'animaux en grande quantité (plusieurs tonnes de nécromasse). Les experts préconisent la mise en place de coopérations fortes entre les différents acteurs (éleveurs, usine d'équarrissage, CDSU, organismes d'État, laboratoires académiques, etc.) au sein de grands projets de recherche afin de faciliter ces études. Dans ce cadre, il serait extrêmement bénéfique de profiter des crises sanitaires existantes pour mener un suivi détaillé et des expérimentations. Les résultats de ces études doivent être rendus publics et accessibles, cette transparence étant la meilleure garantie de validité scientifique et d'acceptation publique. Enfin, une coopération internationale serait souhaitable, cette problématique étant largement partagée et transposable entre pays.

Plus précisément, afin de lever les incertitudes relatives à l'utilisation de la chaux sur les cadavres enfouis, et de confirmer certaines hypothèses émises dans ce rapport, les besoins de recherche portent sur :

- la mise en place de protocoles expérimentaux et d'études visant à démontrer l'efficacité de la chaux sur les microorganismes (y compris des agents pathogènes) présents dans les cadavres et à préciser les modalités précises d'utilisation dans ces situations (dose à utiliser, type de chaux, ajout d'eau ou non, etc.) pour assainir des cadavres d'animaux lors de l'enfouissement ;
- l'étude de l'impact de la chaux sur la décomposition des cadavres ;
- l'évaluation de l'impact de pré-traitements sur les cadavres, comme le broyage par exemple, avant l'application de chaux ;
- l'évaluation de l'impact environnemental potentiel en cas d'utilisation de la chaux à ces fins ;
- l'évaluation de l'efficacité et de l'intérêt de la création d'une zone sécurisée autour de la fosse d'enfouissement en considérant la chaux comme une barrière à la diffusion d'agents pathogènes.

Concernant les modalités de gestion elles-mêmes, le GT recommande :

- d'étudier des modalités de stockage temporaire sur site, ou de pré-traitement des cadavres. Certaines méthodes sont en cours de développement (fermentation, conservation acide, bioréduction, etc.) mais ne sont pas encore disponibles à grande échelle pour être utilisables sur le terrain. Elles constituent cependant des pistes à investiguer pour augmenter le panel de méthodes disponibles pour stocker les cadavres de façon sûre, en attendant leur élimination définitive et éventuellement d'en réduire le volume à traiter. De même, l'incinération par rideau d'air semble être une modalité intéressante, mais cette méthode nécessite du matériel spécifique dont la disponibilité en France n'est pas connue.

Concernant la cinétique de dégradation des cadavres, les experts recommandent :

- d'améliorer les outils de suivi et d'enregistrement des sites d'enfouissement et de capitaliser les données déjà existantes (expérimentation, retours d'expériences, échanges). A ces fins, il conviendrait d'établir au préalable les protocoles d'enregistrement et de suivi, en associant à la fois des structures de recherche publique et des organisations professionnelles. Ces suivis pourraient être complétés par des expérimentations de terrain visant à répondre à certaines questions précises ;
- d'effectuer des recherches en modélisation afin de développer des outils d'aide à la décision (modèle prévisionnel qui orienterait vers différents types de gestion en fonction de certains paramètres d'entrée comme l'espèce, la quantité de cadavres, la cause de la mortalité etc.) ;
- de réaliser des recherches sur l'impact des intrants (antibiotiques, antiparasitaires, etc.) sur la décomposition des cadavres, sur l'environnement, et sur les risques éventuels d'antibiorésistance (ou de résistance aux antiparasitaires). La présence de ces substances pourrait constituer un critère décisionnel pour le choix de la méthode de gestion de certains cadavres : des animaux ayant fait l'objet d'un traitement récent pourraient être prioritaires pour une prise en charge par l'équarrissage par exemple ;
- de mettre au point des méthodes non invasives permettant le suivi de l'évolution des cadavres au niveau des différents sites de gestion (e.g. analyse des COVs comme marqueurs de suivi).

➤ **Recommandations concernant la réglementation actuelle :**

Les membres du GT préconisent d'étudier la possibilité de recourir au compostage pour les cadavres de volailles ou encore de poissons (et éventuellement de porcs) et d'apporter par des études supplémentaires des éléments objectifs qui permettraient de reconsidérer l'interdiction européenne.

Par ailleurs, le GT souligne que prochainement, l'utilisation de la chaux sera autorisée par AMM pour des usages précis (désinfection des surfaces et des parcours). L'utilisation sur les cadavres n'ayant pas été incluse dans le cadre de la demande d'AMM, il ne sera alors plus possible de recourir à la chaux pour cet usage. Le GT recommande d'envisager les modalités d'une extension de cette demande d'AMM.

➤ **Recommandations sur la mise en œuvre des opérations de gestion des cadavres et de gestion des situations de crise**

Les membres du GT insistent sur **l'importance d'anticiper** et de tester les modalités de gestion avant la crise afin d'être opérationnel lorsque celle-ci survient. Ainsi, les membres du GT préconisent, en amont de la crise :

- de disposer d'une estimation (approximative) des quantités maximales de cadavres qui pourraient nécessiter une prise en charge en cas d'événement exceptionnel à l'échelle d'un territoire (e.g. département) ;
- de disposer d'une estimation des quantités de cadavres pouvant être pris en charge par les organismes chargés de la collecte (capacités de transport) et du traitement (usines d'équarrissage) et ainsi d'identifier les besoins éventuels, ainsi que les territoires dans lesquels des problèmes pourraient se poser ;
- d'identifier les différents interlocuteurs et d'établir des procédures en concertation avec les différents acteurs impliqués dans la gestion des cadavres, et d'avoir déterminé des seuils d'alerte afin d'enclencher des actions avant d'atteindre une situation de blocage (prise en compte de signaux *via* les réseaux de suivi de mortalité par exemple les données de l'Observatoire des Mortalités des Animaux de Rente (OMAR), détermination d'un seuil d'alerte prédéfini par les entreprises de collecte et d'équarrissage). Les plans de délestage entre les usines d'équarrissage et les « CSDU » devraient être clairement établis (en impliquant d'avantage les « CSDU » dans l'élaboration de ceux-ci) ;
- d'établir une liste de critères permettant de prioriser les collectes (e.g. espèces prioritaires, lots prioritaires, etc. comme demandé dans la question complémentaire de la DGAL paragraphe 1.2 du présent rapport) ;
- d'inciter davantage les élevages à s'équiper de systèmes permettant de stocker temporairement les cadavres sous couvert du froid ;
- comme déjà évoqué auparavant, d'établir un protocole de suivi des sites d'enfouissement hors « CSDU » (paramètres suivis, durée du suivi, méthodes et matériels nécessaires, etc.) ce qui inclut d'en assurer l'enregistrement et la traçabilité ;
- de disposer dans chaque département d'un inventaire des sites avec possibilité d'enfouissement, ainsi que de la liste des hydrogéologues agréés pouvant être sollicités ;

-
- de mettre à jour les PNISU ainsi que les rapports d'étude des hydrogéologues ;
 - de constituer une cellule nationale (groupe constitué de référents spécifiquement formés à la gestion des cadavres dans ces situations d'urgence) mobilisable en temps de crise pour appuyer et aider les équipes en charge de la gestion de crise à l'échelle locale, dont la constitution doit également être anticipée. Ces groupes nationaux et locaux devraient être constitués le plus rapidement possible et participer aux différents éléments de la phase d'anticipation ;
 - d'augmenter les échanges avec les autres pays ayant été confrontés à des crises sanitaires (PPA, influenza aviaire, gestion des cadavres de visons dans le contexte COVID-19, etc.), prendre en compte et organiser les retours d'expérience (méthode de gestion, quantité de cadavres, utilisation de la chaux, etc.) avec ces pays.

Si, dans un premier temps, il était envisagé de mettre en place ces recommandations dans un nombre restreint de départements pilotes, la priorité pourrait être donnée aux départements :

- qui ont fait face récemment à des épizooties récurrentes (e.g. influenza aviaire) ou à des risques d'introduction (e.g. PPA) et qui pourraient donc disposer d'éléments et de retours d'expérience récents ;
- ayant connu des épisodes caniculaires importants avec une quasi saturation des usines de traitement des cadavres ;
- avec des bassins de production importants dans lesquels les procédures fonctionnent bien. Inclure des départements présentant des typologies différentes : bassins avec plusieurs filières de production vs. bassins avec une filière prédominante, des types d'élevage particuliers (pisciculture, aviculture, etc.), permettrait d'identifier plus rapidement les procédures qui fonctionnent et les écueils éventuels.

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail « Enfouissement des cadavres d'animaux » et par le comité d'experts spécialisé Santé et Bien-Etre des Animaux : le 8 juin 2021.

7 Bibliographie

7.1 Publications

- Aitkenhead-Peterson, J. A., C. G. Owings, M. B. Alexander, N. Larison et J. A. Bytheway. 2012. "Mapping the lateral extent of human cadaver decomposition with soil chemistry." *Forensic Science International* 216 (1): 127-134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.09.007>.
- Amtmann, A., I. Ahmed, P. Zahner-Rimmel, A. Mletzko, L. K. Jordan, M. Oberle, H. Wedekind, J. Christian, S. M. Bergmann et A. M. Becker. 2020. "Virucidal effects of various agents-including protease-against koi herpesvirus and viral haemorrhagic septicaemia virus." *J Fish Dis* 43 (2): 185-195. <https://doi.org/10.1111/jfd.13106>.
- Aneyo, I., O. Alafia, F. Doherty, R. Udoma, B. Balogun et A. Adeola. 2020. "Aerobic microbe community and necrophagous insects associated with decomposition of pig carrion poisoned with lead." *Leg Med (Tokyo)* 42: 7 p. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2019.101638>.
- Anses. 2013. *Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail relatif à un projet de règlement européen portant sur une méthode de stockage aérobie de cadavres de porcs suivi d'une (co)incinération du produit*. Anses (Maisons Alfort, France :).
- Anses. 2018a. *Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail relatif à la mise à jour des connaissances sur les méthodes et procédés d'inactivation du virus de la peste porcine africaine*. Anses (Maisons Alfort, France).
- Anses. 2018b. *Bulletin épidémiologique santé animale, alimentation: Impact de la température sur la mortalité bovine : brève revue*. Anses (Maisons-Alfort, France).
- Antea. 2010. *Elaboration d'une méthodologie de choix et de gestion des sites d'enfouissement des sous-produits de la venaison*. Antea Fédération Nationale des Chasseurs, 33 p.
- Australia, Animal Health. 2015. *Operational manual: Disposal (Version 3.1). Australian Veterinary Emergency Plan (AUSVETPLAN)*. National Biosecurity Committee, Canberra, ACT. www.animalhealthaustralia.com.au, 106 p.
- Baba, I.A., M.T. Bantay, A.A. Khan et N. Nighat. 2017. "Traditional methods of carcass disposal: a review." *J Dairy Vet Anim Res* 5 (1): 21-27.
- Bachmann, Jutta et Tal Simmons. 2010. "The Influence of Preburial Insect Access on the Decomposition Rate." *Journal of Forensic Sciences* 55 (4): 893-900. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2010.01403.x>.
- Barton, P. S., M. J. Evans, C. N. Foster, J. L. Pechal, J. K. Bump, M. M. Quaggiotto et M. E. Benbow. 2019. "Towards Quantifying Carrion Biomass in Ecosystems." *Trends Ecol Evol* 34 (10): 950-961. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.06.001>.
- Bauza-Kaszewska, J., Z. Paluszak et K. Skowron. 2014. "Viability of Clostridium sporogenes spores after CaO hygienization of meat waste." *Ann Agric Environ Med* 21 (3): 485-8. <https://doi.org/10.5604/12321966.1120588>.
- Beans, Carolyn. 2018. "News Feature: Can microbes keep time for forensic investigators?" *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (1): 3-6. <https://doi.org/10.1073/pnas.1718156114>.

- Benbow, M. E., J. L. Pechal, J. M. Lang, R. Erb et J. R. Wallace. 2015. "The Potential of High-throughput Metagenomic Sequencing of Aquatic Bacterial Communities to Estimate the Postmortem Submersion Interval." *J Forensic Sci* 60 (6): 1500-10. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12859>.
- Benbow, M. Eric, Philip S. Barton, Michael D. Ulyshen, James C. Beasley, Travis L. DeVault, Michael S. Strickland, Jeffery K. Tomberlin, Heather R. Jordan et Jennifer L. Pechal. 2019. "Necrobiome framework for bridging decomposition ecology of autotrophically and heterotrophically derived organic matter." *Ecological Monographs* 89 (1): e01331. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ecm.1331>.
- Benninger, Laura A., David O. Carter et Shari L. Forbes. 2008. "The biochemical alteration of soil beneath a decomposing carcass." *Forensic Science International* 180 (2): 70-75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2008.07.001>.
- Bergmann, R. C., T. K. Ralebitso-Senior et T. J. Thompson. 2014. "An RNA-based analysis of changes in biodiversity indices in response to *Sus scrofa domestica* decomposition." *Forensic Sci Int* 241: 190-4. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.06.001>.
- Bertrand, M., J.M. Quemener et A.M. Robert. 2006. *Enfouissement de carcasses d'animaux en cas d'épizootie majeure*. ENSP, 69 p.
- Blake, J. P. et J. O. Donald. 1992. "Alternatives for the Disposal of Poultry Carcasses1." *Poultry Science* 71 (7): 1130-1135. <https://doi.org/https://doi.org/10.3382/ps.0711130>.
- Bolt, G. H. et M. G. M. Bruggenwert. 1978. *Soil chemistry: developments in soil science*. 2 ed. Amsterdam: Elsevier.
- Bonhot, J., M. Schwarz et R. Rynk. 2014. *Composting animal mortalities*. Institut de gestion des déchets de Cornell. <https://ecommons.cornell.edu/handle/1813/37369>.
- Bornemissza, G. F. . 1957. "An analysis of arthropod succession in carrion and the effect of its decomposition on the soil fauna." *Aust J Zool* 5: 1-12.
- Bøtner, A. et G. J. Belsham. 2012. "Virus survival in slurry: analysis of the stability of foot-and-mouth disease, classical swine fever, bovine viral diarrhoea and swine influenza viruses." *Vet Microbiol* 157 (1-2): 41-9. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2011.12.010>.
- Boumba, Vassiliki A., Kallirroe S. Ziavrou et Theodore Vougiouklakis. 2008. "Biochemical pathways generating post-mortem volatile compounds co-detected during forensic ethanol analyses." *Forensic Science International* 174 (2): 133-151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.03.018>.
- Brglez, B. 2003. *Disposal of poultry carcasses in catastrophic avian influenza outbreaks: a comparison of methods (technical report for Master of Public Health)*. University of North Carolina: Chapel Hill, NC, 105 p.
- Brooks, J. W. 2016. "Postmortem Changes in Animal Carcasses and Estimation of the Postmortem Interval." *Vet Pathol* 53 (5): 929-40. <https://doi.org/10.1177/0300985816629720>.
- Buffie, C. G. et E. G. Pamer. 2013. "Microbiota-mediated colonization resistance against intestinal pathogens." *Nat Rev Immunol* 13 (11): 790-801. <https://doi.org/10.1038/nri3535>.
- Bugajski, K. N., C. C. Seddon et R. E. Williams. 2011. "A comparison of blow fly (Diptera: Calliphoridae) and beetle (Coleoptera) activity on refrigerated only versus frozen-thawed pig carcasses in Indiana." *J Med Entomol* 48 (6): 1231-5. <https://doi.org/10.1603/me10215>.
- Burcham, Z. M., C. A. Cowick, C. N. Baugher, J. L. Pechal, C. J. Schmidt, J. W. Rosch, M. E. Benbow et H. R. Jordan. 2019. "Total RNA Analysis of Bacterial Community Structural and Functional Shifts Throughout Vertebrate Decomposition." *J Forensic Sci* 64 (6): 1707-1719. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14083>.

- Cano, R. J. et M. K. Borucki. 1995. "Revival and identification of bacterial spores in 25- to 40-million-year-old Dominican amber." *Science* 268 (5213): 1060. <https://doi.org/10.1126/science.7538699>.
- Carter, D. O., D. Yellowlees et M. Tibbett. 2007. "Cadaver decomposition in terrestrial ecosystems." *Naturwissenschaften* 94 (1): 12-24. <https://doi.org/10.1007/s00114-006-0159-1>.
- Casper, J.L. 1861. *Handbook of the practice of forensic medicine, based upon personal experience*. 3 ed.: London: The New Sydenham Society.
- Chabart, M., B. Chevrier et C. Blanc. 2010. *Identification des zones d'exclusion à l'enfouissement de cadavres d'animaux dans le département de la Marne* (51). BRGM, 72 p.
- Champion, H. J., J. Gloster, I. S. Mason, R. J. Brown, A. I. Donaldson, D. B. Ryall et A. J. M. Garland. 2002. "Investigation of the possible spread of foot-and-mouth disease virus by the burning of animal carcasses on open pyres." *Veterinary Record* 151: 593-600.
- Chen, S. J., M. C. Hung, K. L. Huang et W. I. Hwang. 2004. "Emission of heavy metals from animal carcass incinerators in Taiwan." *Chemosphere* 55 (9): 1197-205. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.12.020>.
- Chevillon, P. 2005. "Gestion des cadavres de porcs en France : volumes, organisation et collecte, stockage et traitement." *Techni Porcs* 28 (3).
- Chiu, L., T. Bazin, M. E. Truchetet, T. Schaefferbeke, L. Delhaes et T. Pradeu. 2017. "Protective Microbiota: From Localized to Long-Reaching Co-Immunity." *Front Immunol* 8: 1678. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.01678>.
- Chiumenti, A., R. Chiumenti, L. F. Diaz, G. M. Savage, L. L. Eggerth et N. Goldstein, 2005, "Modern Composting Technologies."
- Chowdhury, Saikat, Geon-Ha Kim, Nanthi Bolan et Philip Longhurst. 2019. "A critical review on risk evaluation and hazardous management in carcass burial." *Process Safety and Environmental Protection* 123: 272-288. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.019>.
- Cobaugh, K. L., S. M. Schaeffer et J. M. DeBruyn. 2015. "Functional and Structural Succession of Soil Microbial Communities below Decomposing Human Cadavers." *PLoS One* 10 (6): e0130201. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130201>.
- Consortium, National Agricultural Biosecurity Center. 2004. *Carcass disposal: a comprehensive review*. USDA Animal & Plant Health Inspection Service Per Cooperative Agreement 02-1001-0355-CA, 717 p.
- Costa, T. et N. Akdeniz. 2019. "A review of the animal disease outbreaks and biosecure animal mortality composting systems." *Waste Manag* 90: 121-131. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.047>.
- Damann, F. E., D. E. Williams et A. C. Layton. 2015. "Potential Use of Bacterial Community Succession in Decaying Human Bone for Estimating Postmortem Interval." *J Forensic Sci* 60 (4): 844-50. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12744>.
- Dautartas, A., M. W. Kenyhercz, G. M. Vidoli, L. Meadows Jantz, A. Mundorff et D. W. Steadman. 2018. "Differential Decomposition Among Pig, Rabbit, and Human Remains." *J Forensic Sci* 63 (6): 1673-1683. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13784>.
- de Klerk, P. F. 2002. "Carcass disposal: lessons from The Netherlands after the foot and mouth disease outbreak of 2001." *Rev Sci Tech* 21 (3): 789-96. <https://doi.org/10.20506/rst.21.3.1376>.
- DeBruyn, J. M. et K. A. Hauther. 2017. "Postmortem succession of gut microbial communities in deceased human subjects." *PeerJ* 5: e3437. <https://doi.org/10.7717/peerj.3437>.

- Dekeirsschiet, J., F. J. Verheggen, M. Gohy, F. Hubrecht, L. Bourguignon, G. Lognay et E. Haubruge. 2009. "Cadaveric volatile organic compounds released by decaying pig carcasses (*Sus domesticus* L.) in different biotopes." *Forensic Sci Int* 189 (1-3): 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.03.034>.
- Dent, B. B., S. L. Forbes et B. H. Stuart. 2004. "Review of human decomposition processes in soil." *Environmental Geology* 45 (4): 576-585. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0913-z>.
- DGAL, Direction Générale de l'Alimentation. 2019. *Plan national d'intervention d'urgence Santé animale: Elimination des cadavres infectés/suspects*. DGAL, 22 p.
- Dias, K. R. 2011. "The forensic characterisation of the soil microbial community in response to cadaver decomposition." Centre for forensic science, The university of western australia.
- Dibner, H., C. Mangca Valdez et D. O. Carter. 2019. "An Experiment to Characterize the Decomposer Community Associated with Carcasses (*Sus scrofa domesticus*) on Oahu, Hawaii." *J Forensic Sci* 64 (5): 1412-1420. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14009>.
- Dickson, G. C., R. T. Poulter, E. W. Maas, P. K. Probert et J. A. Kieser. 2011. "Marine bacterial succession as a potential indicator of postmortem submersion interval." *Forensic Sci Int* 209 (1-3): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.10.016>.
- Dubie, T. R., J. L. Talley, J. B. Payne, A. W. Wayadande, J. Dillwith et C. Richards. 2017. "Filt Fly Activity Associated With Composted and Noncomposted Beef Cadavers and Laboratory Studies on Volatile Organic Compounds." *J Med Entomol* 54 (5): 1299-1304. <https://doi.org/10.1093/jme/tjx073>.
- Dubois, Lena M., Pierre-Hugues Stefanuto, Laetitia Heudt, Jean-François Focant et Katelynn A. Perrault. 2018. "Characterizing decomposition odor from soil and adipocere samples at a death scene using HS-SPME-GC×GC-HRTOFMS." *Forensic Chemistry* 8: 11-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forc.2018.01.001>.
- EFSA. 2010. *Scientific Opinion on the safety and efficacy of Avatec® 150G (lasalocid A sodium) for turkeys*. EFSA Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP).
- EFSA. 2012. *Scientific opinion on composting and incineration of dead-on-farm pigs*. EFSA Panel on biological hazards (BIOHAZ), 11p.
- EFSA. 2014. *Scientific Opinion on African swine fever*. EFSA.
- Ellis, D. B. 2001. "Carcass disposal issues in recent disasters, accepted methods, and suggested plan to mitigate future events." Thesis in Masters of Public Administration, Texas State University–San Marcos (formerly Southwest Texas State University).
- Erickson, L. E., E. Fayet, B. K. Kakumanu et L. C. Davis. 2004. *Anaerobic digestion. Chapter 7. In Carcass Disposal: A Comprehensive Review*. National Agricultural Biosecurity Center (Kansas State University, Manhattan).
- Evans, M. J. 1963. *The chemistry of death*. Thomas, Springfield.
- Fancher, J. P., J. A. Aitkenhead-Peterson, T. Farris, K. Mix, A. P. Schwab, D. J. Wescott et M. D. Hamilton. 2017. "An evaluation of soil chemistry in human cadaver decomposition islands: Potential for estimating postmortem interval (PMI)." *Forensic Science International* 279: 130-139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2017.08.002>.
- Fédération Nationale des Chasseurs. 2019. *Enfouissement des déchets de venaison issus de la chasse: bonnes pratiques de réalisation*. FNC.
- Fiedler, S. et M. Graw. 2003. "Decomposition of buried corpses, with special reference to the formation of adipocere." *Naturwissenschaften* 90 (7): 291-300. <https://doi.org/10.1007/s00114-003-0437-0>.

- Finley, S. J., J. L. Pechal, M. E. Benbow, B. K. Robertson et G. T. Javan. 2016. "Microbial Signatures of Cadaver Gravesoil During Decomposition." *Microb Ecol* 71 (3): 524-9. <https://doi.org/10.1007/s00248-015-0725-1>.
- Forbes, Shari L., Barbara H. Stuart et Boyd B. Dent. 2005. "The effect of the burial environment on adipocere formation." *Forensic Science International* 154 (1): 24-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.09.107>.
- Fraser, H. 2009. *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs. Enfouissement des cadavres d'animaux morts à la ferme*. Ministère de l'agriculture, alimentation et des affaires rurales, Ontario, 8 p.
- Freedman, R. et R. Fleming. 2003. "Water quality impacts of burying livestock mortalities." In: Paper Presented to the Livestock Mortality Recycling Project Steering Committee, Ridgeway College, University of Guelph, Canada; 2003.
- Gaballah, Mohamed S., Jianbin Guo, Hui Sun, Dominic Aboagye, Mostafa Sobhi, Atif Muhmood et Renjie Dong. 2021. "A review targeting veterinary antibiotics removal from livestock manure management systems and future outlook." *Bioresource Technology* 333: 125069. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125069>.
- Gill King, H. 1997. "Chemical and ultrastructural aspects of decomposition." Dans *Forensic Taphonomy: the postmortem fate of human remains*, édité par Boca Raton CRC Press, 105-117.
- Glanville, T.D. 2006. "Environmental Impacts of Emergency Livestock Mortality Composting—Leachate Release and Soil Contamination." Agricultural and Biosystems Engineering, Iowa State University.
- Glanville, T.D. 2008. *Composting Swine Mortalities in Iowa*. Agriculture and Environment Extension Publications. http://lib.dr.iastate.edu/extension_ag_pubs/83.
- Graczyk, T. K., M. Kacprzak, E. Neczaj, L. Tamang, H. Graczyk, F. E. Lucy et A. S. Girouard. 2008. "Occurrence of Cryptosporidium and Giardia in sewage sludge and solid waste landfill leachate and quantitative comparative analysis of sanitization treatments on pathogen inactivation." *Environ Res* 106 (1): 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2007.05.005>.
- Gray, T. R. G. et S. T. Williams. 1971. *Soil micro-organisms*. édité par Oliver and Boyd. Edinburg.
- Guan, J., M. Chan, C. Grenier, B. W. Brooks, J. L. Spencer, C. Kranendonk, J. Copps et A. Clavijo. 2010. "Degradation of foot-and-mouth disease virus during composting of infected pig carcasses." *Canadian journal of veterinary research = Revue canadienne de recherche veterinaire* 74 (1): 40-44.
- Gwenzi, W. 2020. "The 'thanato-resistome' - The funeral industry as a potential reservoir of antibiotic resistance: Early insights and perspectives." *Sci Total Environ* 749: 141120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141120>.
- Gwyther, C. L., A. P. Williams, P. N. Golyshin, G. Edwards-Jones et D. L. Jones. 2011. "The environmental and biosecurity characteristics of livestock carcass disposal methods: A review." *Waste Manag* 31 (4): 767-78. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.12.005>.
- Han, I., K. Yoo, B. R. Kang, J. H. No, G. N. Wee, M. I. Khan, T. Y. Jeong et T. K. Lee. 2018. "A comparison study of the potential risks induced in arable land and forest soils by carcass-derived pollutants." *Environ Geochem Health* 40 (1): 451-460. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9932-7>.
- Hauther, K. A., K. L. Cobaugh, L. M. Jantz, T. E. Sparer et J. M. DeBruyn. 2015. "Estimating Time Since Death from Postmortem Human Gut Microbial Communities." *J Forensic Sci* 60 (5): 1234-40. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12828>.
- Hayama, Y., Y. Kimura, T. Yamamoto, S. Kobayashi et T. Tsutsui. 2015. "Potential risk associated with animal culling and disposal during the foot-and-mouth disease

- epidemic in Japan in 2010." *Res Vet Sci* 102: 228-30. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2015.08.017>.
- Higgins, I.J. et R.G. Burns. 1975. "The chemistry and microbiology of pollution." *Journal of basic microbiology* 17 (3).
- Himsworth, C. G. 2008. "The danger of lime use in agricultural anthrax disinfection procedures: the potential role of calcium in the preservation of anthrax spores." *Can Vet J* 49 (12): 1208-10.
- Hseu, Zeng-Yei et Zueng-Sang Chen. 2017. "Experiences of Mass Pig Carcass Disposal Related to Groundwater Quality Monitoring in Taiwan." *Sustainability* 9 (1): 46 p.
- Hyde, E. R., D. P. Haarmann, J. F. Petrosino, A. M. Lynne et S. R. Bucheli. 2015. "Initial insights into bacterial succession during human decomposition." *Int J Legal Med* 129 (3): 661-71. <https://doi.org/10.1007/s00414-014-1128-4>.
- Iancu, L., D. O. Carter, E. N. Junkins et C. Purcarea. 2015. "Using bacterial and necrophagous insect dynamics for post-mortem interval estimation during cold season: Novel case study in Romania." *Forensic Sci Int* 254: 106-17. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.07.024>.
- IFIP. 2009. *Manuel d'application du Guide de Bonnes Pratiques d'Hygiène en élevage de porcs*.
- Ito, M., M. S. Alam, M. Suzuki, S. Takahashi, M. Komura, N. Sangsriratakul, D. Shoham et K. Takehara. 2018. "Virucidal activity of a quaternary ammonium compound associated with calcium hydroxide on avian influenza virus, Newcastle disease virus and infectious bursal disease virus." *J Vet Med Sci* 80 (4): 574-577. <https://doi.org/10.1292/jvms.18-0006>.
- Jacobson, A., L. Lam, M. Rajendram, F. Tamburini, J. Honeycutt, T. Pham, W. Van Treuren, K. Pruss, S. R. Stabler, K. Lugo, D. M. Bouley, J. G. Vilches-Moure, M. Smith, J. L. Sonnenburg, A. S. Bhatt, K. C. Huang et D. Monack. 2018. "A Gut Commensal-Produced Metabolite Mediates Colonization Resistance to Salmonella Infection." *Cell Host Microbe* 24 (2): 296-307 e7. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2018.07.002>.
- Janaway, R. C. 1997. "The decay of buried human remains and their associated materials." Dans *Studies in crime: an introduction to forensic archaeology*, édité par Roberts C Hunter J, Martin A, 58-85. Routledge, London.
- Janaway, R. C., S. L. Percival et A. S. Wilson. 2009. "Decomposition of human remains." Dans *Microbiology and aging*, édité par Steven L. Percival.
- Javan, G. T., S. J. Finley, I. Can, J. E. Wilkinson, J. D. Hanson et A. M. Tarone. 2016. "Human Thanatobiome Succession and Time Since Death." *Sci Rep* 6: 29598. <https://doi.org/10.1038/srep29598>.
- Johnson, Aidan P., Katarina M. Mikac et James F. Wallman. 2013. "Thermogenesis in decomposing carcasses." *Forensic Science International* 231 (1): 271-277. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.05.031>.
- Johnson, H. R., D. D. Trinidad, S. Guzman, Z. Khan, J. V. Parziale, J. M. DeBruyn et N. H. Lents. 2016. "A Machine Learning Approach for Using the Postmortem Skin Microbiome to Estimate the Postmortem Interval." *PLoS One* 11 (12): e0167370. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167370>.
- Joung, Ha Kyung, Sang Ha Han, Su-Jung Park, Weon-Hwa Jheong, Tae Seok Ahn, Joong-Bok Lee, Yong-Seok Jeong, Kyung Lib Jang, Gyu-Cheol Lee, Ok-Jae Rhee, Jeong-Woong Park et Soon Young Paik. 2013. "Nationwide surveillance for pathogenic microorganisms in groundwater near carcass burials constructed in South Korea in 2010." *International journal of environmental research and public health* 10 (12): 7126-7143. <https://doi.org/10.3390/ijerph10127126>.

- Kalbasi, A., S. Mukhtar, S. E. Hawkins et B. W. Auvermann. 2005. "Carcass Composting for Management of Farm Mortalities: A Review." *Compost Science & Utilization* 13 (3): 180-193. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2005.10702239>.
- Kaown, Dugin, Heejung Kim, Hee Sun Moon, Kyung-Seok Ko et Kang-Kun Lee. 2015. "Hydrogeochemical and microbial characteristics in aquifers contaminated with leachate from animal carcass disposal sites." *Environmental Earth Sciences* 73 (8): 4647-4657. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3750-3>.
- Kaye, G., P. Weber, A. Evans et R. Venezia. 1998. "Efficacy of Alkaline Hydrolysis as an Alternative Method for Treatment and Disposal of Infectious Animal Waste." *Contemp Top Lab Anim Sci* 37 (3): 43-46.
- Keener, H. M. , D. L. Elwell et M. J. Monnin. 2000. "Procedures and equations for sizing of structures and windrows for composting animal mortalities." 16 (6): 681-692.
- Keener, H.M. et D. L. Elwell. 2000. "Mortality composting principles and operation." Dans *Ohio's Livestock and Poultry Mortality Composting Manual*. Ohio: The Ohio State University Extension.
- Ki, B. M., Y. M. Kim, J. M. Jeon, H. W. Ryu et K. S. Cho. 2017. "Characterization of Bacterial Community Dynamics during the Decomposition of Pig Carcasses in Simulated Soil Burial and Composting Systems." *J Microbiol Biotechnol* 27 (12): 2199-2210. <https://doi.org/10.4014/jmb.1709.09032>.
- Kim, Hyun-su et Kangjoo Kim. 2012. "Microbial and chemical contamination of groundwater around livestock mortality burial sites in Korea — a review." *Geosciences Journal* 16 (4): 479-489. <https://doi.org/10.1007/s12303-012-0036-1>.
- Kim, Mi Hyung et Geonha Kim. 2017. "Analysis of environmental impacts of burial sites." *Journal of Material Cycles and Waste Management* 19 (1): 432-442. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0439-y>.
- King, M. A., B. Seekins et M. L. Hutchison. 2005. "Observations of static pile composting of large animal carcasses using different media." Proc Symposium on Composting Mortalities and Slaughterhouse Residuals, University of Maine Cooperative Extension, Portland, May 24–25 2005.
- Koch, Klaus M. A. et Bernhard Euler. 1984. "Lime as a disinfectant for pig slurry contaminated with Aujeszky's disease (Pseudorabies) virus (ADV)." *Agricultural Wastes* 9 (4): 289-297. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0141-4607\(84\)90087-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0141-4607(84)90087-8).
- Koh, Eun-Hee, Dugin Kaown, Hyun Jung Kim, Kang-Kun Lee, Hyunkoo Kim et Sunhwa Park. 2019. "Nationwide groundwater monitoring around infectious-disease-caused livestock mortality burials in Korea: Superimposed influence of animal leachate on pre-existing anthropogenic pollution." *Environment International* 129: 376-388. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.073>.
- Kwon, M. J., S. T. Yun, B. Ham, J. H. Lee, J. S. Oh et W. W. Jheong. 2017. "Impacts of leachates from livestock carcass burial and manure heap sites on groundwater geochemistry and microbial community structure." *PLoS One* 12 (8): e0182579. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182579>.
- Lauber, C. L., J. L. Metcalf, K. Keepers, G. Ackermann, D. O. Carter et R. Knight. 2014. "Vertebrate decomposition is accelerated by soil microbes." *Appl Environ Microbiol* 80 (16): 4920-9. <https://doi.org/10.1128/AEM.00957-14>.
- Lee, Jae-Han, Deogratius Luyima, Chang-Hoon Lee, Seong-Jin Park et Taek-Keun Oh. 2020. "Efficiencies of unconventional bulking agents in composting food waste in Korea." *Applied Biological Chemistry* 63 (1): 68. <https://doi.org/10.1186/s13765-020-00554-6>.
- Lee, Jae-In, Eun-Ji Cho, Fritz Ndumbe Lyonga, Chang-Hee Lee, Sue-Yun Hwang, Dock-Hwan Kim, Chang-Gu Lee et Seong-Jik Park. 2021. "Thermo-Chemical Treatment for

- Carcass Disposal and the Application of Treated Carcass as Compost." *Applied Sciences* 11 (1): 431.
- Lobb, B., R. Hodgson, M. D. J. Lynch, M. J. Mansfield, J. Cheng, T. C. Charles, J. D. Neufeld, P. M. Craig et A. C. Doxey. 2020. "Time Series Resolution of the Fish Necrobiome Reveals a Decomposer Succession Involving Toxigenic Bacterial Pathogens." *mSystems* 5 (2). <https://doi.org/10.1128/mSystems.00145-20>.
- Lopes, M., V. F. Roll, F. L. Leite, M. A. Dai Prá, E. G. Xavier, T. Heres et B. S. Valente. 2013. "Quicklime treatment and stirring of different poultry litter substrates for reducing pathogenic bacteria counts." *Poult Sci* 92 (3): 638-44. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02700>.
- Malone, G. W. . 1988. "Dead bird and hatchery waste disposal and utilization." Proc National Poultry Waste Management Symposium, Columbus, Ohio.
- Martin, Clément, Philippe Maesen, Damien Minchilli, Frédéric Francis et François Verheggen. 2021. "Forensic taphonomy: Characterization of the gravesoil chemistry using a multivariate approach combining chemical and volatile analyses." *Forensic Science International* 318: 110569. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110569>.
- Melis, Claudia, Nuria Selva, Ivonne Teurlings, Christina Skarpe, John D. C. Linnell et Reidar Andersen. 2007. "Soil and vegetation nutrient response to bison carcasses in Białowieża Primeval Forest, Poland." *Ecological Research* 22 (5): 807-813. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11284-006-0321-4>.
- Metcalfe, J. L. 2019. "Estimating the postmortem interval using microbes: Knowledge gaps and a path to technology adoption." *Forensic Sci Int Genet* 38: 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2018.11.004>.
- Metcalfe, J. L., D. O. Carter et R. Knight. 2016. "Microbiology of death." *Curr Biol* 26 (13): 561-563. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.03.042>.
- Metcalfe, J. L., L. Wegener Parfrey, A. Gonzalez, C. L. Lauber, D. Knights, G. Ackermann, G. C. Humphrey, M. J. Gebert, W. Van Treuren, D. Berg-Lyons, K. Keepers, Y. Guo, J. Bullard, N. Fierer, D. O. Carter et R. Knight. 2013. "A microbial clock provides an accurate estimate of the postmortem interval in a mouse model system." *Elife* 2: e01104. <https://doi.org/10.7554/eLife.01104>.
- Middleton, T. F. et P. R. Ferket. 2001. "Effect of level of acidification by phosphoric acid, storage temperature, and length of storage on the chemical and biological stability of ground poultry mortality carcasses." *Poult Sci* 80: 1144–1153.
- Middleton, T. F., P. R. Ferket et L. C. Boyd. 2001. "The Effect of Ethoxyquin on The Quality of Ground Poultry Mortality Carcasses Preserved by Lactic Acid Fermentation and Phosphoric Acid Stabilization1." *Poultry Science* 80 (8): 1154-1163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/ps/80.8.1154>.
- Miller, L. et G. Flory. 2018. *Gestion des carcasses dans les petites et moyennes exploitations d'élevage. Considérations pratiques*. FAO, 12 p.
- Miller, L.P., R. A. Milkis et G.A. Flory. 2020. *Carcass management guidelines. Effective disposal of animal carcasses and contaminated materials on small to medium-sized farms*. FAO (Rome), 56 p.
- Morgan, M. et F. Macdonald. 1969. "Tests show MB Tuberculosis doesn't survive composting." *Journal of Environmental Health* 32 (1): 101-108.
- Mukhtar, S., A. Kalbasi et A. Ahmed. 2004. *Composting. Chapter 3. In Carcass Disposal: A Comprehensive Review*. National Agricultural Biosecurity Center, Kansas State University, Manhattan. USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass Disposal Working Group.

- Murphy, J.P., J.P. Harner, T. Strahm et J. DeRouchey. 2004. *Composting cattle mortalities*. St Joseph, MO: The American Society of Agricultural Engineers.
- Notter, Stephanie J., Barbara H. Stuart, Rebecca Rowe et Neil Langlois. 2009. "The Initial Changes of Fat Deposits During the Decomposition of Human and Pig Remains." *Journal of Forensic Sciences* 54 (1): 195-201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2008.00911.x>.
- O Carter, D. 2017. *Human decomposition ecology*. University of Nebraska Lincoln, USA.
- Paczkowski, S. et S. Schütz. 2011. "Post-mortem volatiles of vertebrate tissue." *Appl Microbiol Biotechnol* 91 (4): 917-35. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3417-x>.
- Pascual, J., C. von Hoermann, A. M. Rottler-Hoermann, O. Nevo, A. Geppert, J. Sikorski, K. J. Huber, S. Steiger, M. Ayasse et J. Overmann. 2017. "Function of bacterial community dynamics in the formation of cadaveric semiochemicals during in situ carcass decomposition." *Environ Microbiol* 19 (8): 3310-3322. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13828>.
- Paul, J. et D. Geesing. 2009. *Compost facility operator manual*. JG Press, USA.
- Pechal, J. L., T. L. Crippen, M. E. Benbow, A. M. Tarone, S. Dowd et J. K. Tomberlin. 2014. "The potential use of bacterial community succession in forensics as described by high throughput metagenomic sequencing." *Int J Legal Med* 128 (1): 193-205. <https://doi.org/10.1007/s00414-013-0872-1>.
- Pechal, J. L., C. J. Schmidt, H. R. Jordan et M. E. Benbow. 2018. "A large-scale survey of the postmortem human microbiome, and its potential to provide insight into the living health condition." *Sci Rep* 8 (1): 5724. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23989-w>.
- Penrith, M. L. et W. Vosloo. 2009. "Review of African swine fever: transmission, spread and control." *J S Afr Vet Assoc* 80 (2): 58-62. <https://doi.org/10.4102/jsava.v80i2.172>.
- Polson, C.J., D.J. Gee et B. Knight. 1985. *The essentials of forensic medicine*. édité par Oxford Pergamon Press.
- Pratt, D. L. 2009. "ENVIRONMENTAL IMPACT OF LIVESTOCK MORTALITIES BURIAL." Department of Agricultural & Bioresource Engineering, University of Saskatchewan.
- Probst, Carolina, Jörn Gethmann, Susanne Amler, Anja Globig, Bent Knoll et Franz J. Conraths. 2019. "The potential role of scavengers in spreading African swine fever among wild boar." *Scientific reports* 9 (1): 11450-11450. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47623-5>.
- Puckowski, A., K. Mioduszevska, P. Łukaszewicz, M. Borecka, M. Caban, J. Maszkowska et P. Stepnowski. 2016. "Bioaccumulation and analytics of pharmaceutical residues in the environment: A review." *J Pharm Biomed Anal* 127: 232-55. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2016.02.049>.
- Rapp, D., P. Potier, L. Jocteur-Monrozier et A. Richaume. 2006. "Prion degradation in soil: possible role of microbial enzymes stimulated by the decomposition of buried carcasses." *Environ Sci Technol* 40 (20): 6324-9. <https://doi.org/10.1021/es060943h>.
- Roberts, Lindsey G. et Gretchen R. Dabbs. 2015. "A Taphonomic Study Exploring the Differences in Decomposition Rate and Manner between Frozen and Never Frozen Domestic Pigs (*Sus scrofa*)." *Journal of Forensic Sciences* 60 (3): 588-594. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1556-4029.12717>.
- Rocha, D.C., C. Da Silva Rocha, D.S. Tavares, S.L. De Moraes Calado et M.P. Gomes. 2021. "Veterinary antibiotics and plant physiology: An overview." *Sci Total Environ*.
- Rodriguez, W. C. et W. M. Bass. 1985. "Decomposition of buried bodies and methods that may aid in their location." *J. Forensic Sci* 30: 836-852.

- Roesch, L. F., R. R. Fulthorpe, A. Riva, G. Casella, A. K. Hadwin, A. D. Kent, S. H. Daroub, F. A. Camargo, W. G. Farmerie et E. W. Triplett. 2007. "Pyrosequencing enumerates and contrasts soil microbial diversity." *Isme j* 1 (4): 283-90. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.53>.
- Rolhion, N., B. Chassaing, M. A. Nahori, J. de Bodt, A. Moura, M. Lecuit, O. Dussurget, M. Berard, M. Marzorati, H. Fehlner-Peach, D. R. Littman, A. T. Gewirtz, T. Van de Wiele et P. Cossart. 2019. "A *Listeria monocytogenes* Bacteriocin Can Target the Commensal *Prevotella copri* and Modulate Intestinal Infection." *Cell Host Microbe* 26 (5): 691-701 e5. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2019.10.016>.
- Rosier, E., S. Loix, W. Develter, W. Van de Voorde, J. Tytgat et E. Cuypers. 2015. "The Search for a Volatile Human Specific Marker in the Decomposition Process." *PLoS One* 10 (9): e0137341. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137341>.
- Rosier, E., S. Loix, W. Develter, W. Van de Voorde, J. Tytgat et E. Cuypers. 2016. "Time-dependent VOC-profile of decomposed human and animal remains in laboratory environment." *Forensic Science International* 266: 164-169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.05.035>.
- Ruenphet, Sakchai, Darsaniya Punyadarsaniya, Tippawan Jantafong et Kazuaki Takehara. 2019. "Stability and virucidal efficacies using powder and liquid forms of fresh charcoal ash and slaked lime against Newcastle disease virus and Avian influenza virus." *Veterinary world* 12 (1): 1-6. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2019.1-6>.
- Sahlström, Leena. 2003. "A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants." *Bioresource Technology* 87 (2): 161-166. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00168-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00168-2).
- Sander, J. E., M. C. Warbington et L. M. Myers. 2002. "Selected methods of animal carcass disposal." *J Am Vet Med Assoc* 220 (7): 1003-5. <https://doi.org/10.2460/javma.2002.220.1003>.
- Sangsriratanakul, N., C. Toyofuku, M. Suzuki, M. Komura, M. Yamada, M. S. Alam, S. Ruenphet, D. Shoham, K. Sakai et K. Takehara. 2018. "Virucidal efficacy of food additive grade calcium hydroxide against surrogate of human norovirus." *J Virol Methods* 251: 83-87. <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2017.10.017>.
- Sato, Y., M. Ishihara, S. Nakamura, K. Fukuda, M. Kuwabara, T. Takayama, S. Hiruma, K. Murakami, M. Fujita et H. Yokoe. 2019. "Comparison of Various Disinfectants on Bactericidal Activity Under Organic Matter Contaminated Environments." *Biocontrol Sci* 24 (2): 103-108. <https://doi.org/10.4265/bio.24.103>.
- Schotsmans, E. M., J. Denton, J. N. Fletcher, R. C. Janaway et A. S. Wilson. 2014. "Short-term effects of hydrated lime and quicklime on the decay of human remains using pig cadavers as human body analogues: Laboratory experiments." *Forensic Sci Int* 238: 142.e1-10. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.12.047>.
- Schotsmans, E. M., J. N. Fletcher, J. Denton, R. C. Janaway et A. S. Wilson. 2014. "Long-term effects of hydrated lime and quicklime on the decay of human remains using pig cadavers as human body analogues: Field experiments." *Forensic Sci Int* 238: 141.e1-141.e13. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.12.046>.
- Schotsmans, Eline M. J., John Denton, Jessica Dekeirsschieter, Tatiana Ivaneanu, Sarah Leentjes, Rob C. Janaway et Andrew S. Wilson. 2012. "Effects of hydrated lime and quicklime on the decay of buried human remains using pig cadavers as human body analogues." *Forensic Science International* 217 (1): 50-59. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.09.025>.
- Scudamore, J. M., G. M. Trevelyan, M. V. Tas, E. M. Varley et G. A. Hickman. 2002. "Carcass disposal: lessons from Great Britain following the foot and mouth disease outbreaks of 2001." *Rev Sci Tech* 21 (3): 775-87. <https://doi.org/10.20506/rst.21.3.1377>.

- Serafini, Suélen, Junior Gonçalves Soares, Camila Felicetti Perosa, Fernanda Picoli, Julia Corá Segat, Aleksandro Schafer Da Silva et Dilmar Baretta. 2019. "Eprinomectin antiparasitic affects survival, reproduction and behavior of *Folsomia candida* biomarker, and its toxicity depends on the type of soil." *Environmental Toxicology and Pharmacology* 72: 103262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.103262>.
- Simmons, Tal, Peter Cross, Rachel Cunliffe et Colin Moffatt. 2010. "The Influence of Insects on Decomposition Rate in Buried and Surface Remains." *Journal of forensic sciences* 55: 889-92. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2010.01402.x>.
- Sorbara, M. T. et E. G. Pamer. 2019. "Interbacterial mechanisms of colonization resistance and the strategies pathogens use to overcome them." *Mucosal Immunol* 12 (1): 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41385-018-0053-0>.
- Spicka, A., R. Johnson, J. Bushing, L. G. Higley et D. O. Carter. 2011. "Carcass mass can influence rate of decomposition and release of ninhydrin-reactive nitrogen into gravesoil." *Forensic Sci Int* 209 (1-3): 80-5. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.01.002>.
- Stenfeldt, Carolina, Fayna Diaz-San Segundo, Teresa de Los Santos, Luis L. Rodriguez et Jonathan Arzt. 2016. "The Pathogenesis of Foot-and-Mouth Disease in Pigs." *Frontiers in veterinary science* 3: 41-41. <https://doi.org/10.3389/fvets.2016.00041>.
- Szelecz, Ildikó, Isabelle Koenig, Christophe V. W. Seppey, Renée-Claire Le Bayon et Edward A. D. Mitchell. 2018. "Soil chemistry changes beneath decomposing cadavers over a one-year period." *Forensic Science International* 286: 155-165. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.02.031>.
- Tablante, N. L., G. W. Malone, F. N. Hegngi, L. E. Carr, P. H. Patterson, G. Felton et N. Zimmerman. 2002. *Guidelines for In-house Composting of Catastrophic Poultry Mortality*. University of Maryland, College Park.
- Takatori, T. 1996. "Investigations on the mechanism of adipocere formation and its relation to other biochemical reactions." *Forensic Sci Int* 80 (1-2): 49-61. [https://doi.org/10.1016/0379-0738\(96\)01927-5](https://doi.org/10.1016/0379-0738(96)01927-5).
- Tamim, N. M. et J. A. Doerr. 2000. "Fermentation of broiler carcasses—Foolproof or not? ." *Poult Persp* 2 (1).
- Tanaka, Y., T. Hasegawa, K. Sugimoto, K. Miura, T. Aketo, N. Minowa, M. Toda, K. Kinoshita, T. Yamashita et A. Ogino. 2014. "Advanced treatment of swine wastewater using an agent synthesized from amorphous silica and hydrated lime." *Environ Technol* 35 (21-24): 2982-7. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.927533>.
- Tao, Y., W. J. M. Probert, K. Shea, M. C. Runge, K. Lafferty, M. Tildesley et M. Ferrari. 2021. "Causes of delayed outbreak responses and their impacts on epidemic spread." *J R Soc Interface* 18 (176): 20200933. <https://doi.org/10.1098/rsif.2020.0933>.
- Temple, K. L., A. K. Camper et G. A. McFeters. 1980. "Survival of two enterobacteria in feces buried in soil under field conditions." *Applied and environmental microbiology* 40 (4): 794-797. <https://doi.org/10.1128/aem.40.4.794-797.1980>.
- Thacker, L. H. 2004. *Alkaline hydrolysis. Chapter 6. In A Carcass Disposal: A Comprehensive Review*. National Agricultural Biosecurity Center, Kansas State University, Manhattan.
- Thew, H.A. 2000. *Effects of Lime on the Decomposition Rate of Buried Remains*. édité par University of Minneapolis.
- Tkachuk, Victoria L., Denis O. Krause, Tim A. McAllister, Katherine E. Buckley, Tim Reuter, Steve Hendrick et Kim H. Ominski. 2013. "Assessing the inactivation of *Mycobacterium avium* subsp. *paratuberculosis* during composting of livestock carcasses." *Applied and environmental microbiology* 79 (10): 3215-3224. <https://doi.org/10.1128/AEM.03768-12>.

- Toyofuku, C., M. S. Alam, M. Yamada, M. Komura, M. Suzuki, H. Hakim, N. Sangsriratanakul, D. Shoham et K. Takehara. 2017. "Enhancement of bactericidal effects of sodium hypochlorite in chiller water with food additive grade calcium hydroxide." *J Vet Med Sci* 79 (6): 1019-1023. <https://doi.org/10.1292/jvms.17-0089>.
- Turner, Claire, Stuart M. Williams, Colin H. Burton, John W. Farrent et Philip J. Wilkinson. 1998. "Laboratory scale inactivation of pig viruses in pig slurry and design of a pilot plant for thermal inactivation." *Water Science and Technology* 38 (4): 79-86. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00500-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00500-9).
- Union des producteurs de chaux. 2009. *Guide pratique d'utilisation de la chaux pour la prévention et le contrôle de la grippe aviaire et autres maladies*. Union des producteurs de chaux.
- Van den Berg, T. et P. Houdart. 2008. "Avian influenza outbreak management: action at time of confirmation, depopulation and disposal methods; the 'Belgian experience' during the H7N7 highly pathogenic avian influenza epidemic in 2003." *Zoonoses Public Health* 55 (1): 54-64. <https://doi.org/10.1111/j.1863-2378.2007.01103.x>.
- Van Kempen, T. . 2004. *New gasifier at North Carolina State University*. North Carolina State University, College of Agriculture and Life Sciences 2-3.
- Vass, A. A. 2001. "Beyond the grave – understanding human decomposition." *Microbiology today* 28.
- Vass, A. A., S. A. Barshick, G. Sega, J. Caton, J. T. Skeen, J. C. Love et J. A. Synsteliën. 2002. "Decomposition chemistry of human remains: a new methodology for determining the postmortem interval." *J Forensic Sci* 47 (3): 542-53.
- Vitosh-Sillman, Sarah, John Dustin Loy, Bruce Brodersen, Clayton Kelling, Kent Eskridge et Amy Millmier Schmidt. 2017. "Effectiveness of composting as a biosecure disposal method for porcine epidemic diarrhea virus (PEDV)-infected pig carcasses." *Porcine health management* 3: 22-22. <https://doi.org/10.1186/s40813-017-0068-z>.
- Watson, Christopher J., Maiken Ueland, Eline M. J. Schotsmans, Jon Sterenberg, Shari L. Forbes et Soren Blau. 2021. "Detecting grave sites from surface anomalies: A longitudinal study in an Australian woodland." *Journal of Forensic Sciences* 66 (2): 479-490. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1556-4029.14626>.
- Whittington, A. E. 2019. "Effects of peri-mortem infection on the entomofauna of decomposing buried human remains - a metadata analysis." *Sci Justice* 59 (4): 452-458. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2019.03.006>.
- Wilkinson, K. G. 2007. "The biosecurity of on-farm mortality composting." *J Appl Microbiol* 102 (3): 609-18. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.03274.x>.
- Wilkinson, K.G., D. Harapas, E. Tee, R.B. Tomkins et R. Premier. 2003. *Strategies for the Safe Use of Poultry Litter in Food Crop Production*. Sydney: Horticulture Australia Ltd.
- Williams, A. R., L. J. Myhill, S. Stolzenbach, P. Nejsun, H. Mejer, D. S. Nielsen et S. M. Thamsborg. 2021. "Emerging interactions between diet, gastrointestinal helminth infection, and the gut microbiota in livestock." *BMC Vet Res* 17 (1): 62. <https://doi.org/10.1186/s12917-021-02752-w>.
- World Health, Organization, Food, Nations Agriculture Organization of the United et Health World Organisation for Animal. 2008. *Anthrax in humans and animals*. 4th ed. ed. Geneva: World Health Organization.
- Yuan, Q., D. D. Snow et S. L. Bartelt-Hunt. 2013a. "Potential water quality impacts originating from land burial of cattle carcasses." *Sci Total Environ* 456-457: 246-53. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.083>.
- Yuan, Qi, Daniel D. Snow et Shannon L. Bartelt-Hunt. 2013b. "Potential water quality impacts originating from land burial of cattle carcasses." *Science of The Total Environment* 456-457: 246-253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.083>.

- Zalewska, M., A. Błażejewska, A. Czapko et M. Popowska. 2021. "Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Animal Manure - Consequences of Its Application in Agriculture." *Front Microbiol* 12: 610656. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.610656>.
- Zani, L., M. Masiulis, P. Bušauskas, K. Dietze, G. Pridotkas, A. Globig, S. Blome, T. Mettenleiter, K. Depner et B. Karvelienė. 2020. "African swine fever virus survival in buried wild boar carcasses." *Transbound Emerg Dis* 67: 2086-2092. <https://doi.org/10.1111/tbed.13554>.
- Zhou, Chong et Roger W. Byard. 2011. "Factors and processes causing accelerated decomposition in human cadavers – An overview." *Journal of Forensic and Legal Medicine* 18 (1): 6-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jflm.2010.10.003>.
- Zhou, R., Y. Wang, M. G. Hilal, Q. Yu, T. Feng et H. Li. 2021. "Temporal succession of water microbiomes and resistomes during carcass decomposition in a fish model." *J Hazard Mater* 403. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123795>.
- Zhou, R., S. Zeng, D. Hou, J. Liu, S. Weng, J. He et Z. Huang. 2019. "Occurrence of human pathogenic bacteria carrying antibiotic resistance genes revealed by metagenomic approach: A case study from an aquatic environment." *J Environ Sci (China)* 80: 248-256. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.01.001>.
- Žižek, Suzana, Martin Dobeic, Štefan Pintarič, Primož Zidar, Silvestra Kobal et Matej Vidrih. 2015. "Degradation and dissipation of the veterinary ionophore lasalocid in manure and soil." *Chemosphere* 138: 947-951. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.032>.

7.2 Normes

AFNOR. 2003. NF X 50-110 *Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise*. AFNOR (indice de classement X 50-110).

ISO (International Organization for Standardization). 1997. *Information and Documentation - Rules for the Abbreviation of Title Words and Titles of Publications*. ISO 4:1997. Paris: ISO.

7.3 Législation et réglementation

Règlement (UE) 2016/429 du Parlement Européen et du Conseil du 9 mars 2016 relatif aux maladies animales transmissibles et modifiant et abrogeant certains actes dans le domaine de la santé animale («législation sur la santé animale») <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32016R0429>

Règlement 528/2012/CE concernant la mise sur le marché et l'utilisation des produits biocides <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0528&from=EN>

Règlement (UE) n ° 142/2011 de la Commission du 25 février 2011 portant application du règlement (CE) n ° 1069/2009 du Parlement européen et du Conseil établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine et portant application de la directive 97/78/CE du Conseil en ce qui concerne certains échantillons et articles exemptés des contrôles vétérinaires effectués aux frontières en vertu de cette directive. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/?uri=CELEX:32011R0142>

Règlement (CE) N° 1069/2009 du Parlement Européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine et abrogeant le règlement (CE) N°1774/2002 (règlement relatif aux sous-produits animaux) – <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:300:0001:0033:FR:PDF>)

Arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000032275960/>

Décret n° 2012-845 du 30 juin 2012
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGITEXT000026091113/>

Articles L. 226-1 à L. 226-8 du CRPM

Article L. 424-9 du Code de l'environnement

Article R. 223-5 du CRPM


Article R. 226-12 du CRPM

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2020-SA-0011

COURRIER ARRIVE
21 JAN. 2020
DIRECTION GENERALE


2020-15-D

MINISTRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION

Direction Générale de l'Alimentation
Bureau des Intrants et de la Santé Publique en Elevage

Suivi par : Christèle Mathonière
Tel : 01 49 55 81 66

bispe.sdspa.dgal@agriculture.gouv.fr
251 rue de Vaugirard
75732 PARIS CEDEX 15

Le Directeur Général de l'Alimentation

à

Monsieur le Directeur Général
de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de
l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail
27-31, avenue du Général Leclerc – B.P. 19
94701 MAISONS ALFORT CEDEX

Paris, 17 JAN. 2020

Objet : Demande d'avis de l'ANSES sur l'évaluation du risque relatif à l'enfouissement de cadavres et déchets de venaison issus d'animaux d'élevage et ou de la faune sauvage

Conformément aux articles L. 1313-1 et 1313-3 du Code de la santé publique, j'ai l'honneur de solliciter un avis de l'Anses sur les risques de dissémination de pathogènes par les cadavres et les sous-produits animaux issus d'animaux d'élevage/de la faune sauvage, lors d'un enfouissement utilisant ou non de la chaux.

Cette demande s'inscrit notamment dans le cas de la découverte de cadavres qui ne peuvent pas être collectés et/ou acheminés dans la filière de transformation des sous-produits animaux ou dans le cas de surmortalité d'animaux liées à des circonstances exceptionnelles telles qu'une canicule, une inondation par exemple.

Les questions ont été classées selon un ordre de priorité décroissant.

1- Dans un contexte de mort « naturelle » consécutive à une circonstance exceptionnelle (canicule, inondation), où toute suspicion de maladie a été écartée : Evaluation du risque de propagation de micro-organismes à la faune domestique ou sauvage à partir de cadavres d'animaux d'élevage morts et enfouis

A – Identifier la cinétique de développement des micro-organismes lors de la décomposition d'un cadavre (suidés, volailles) et notamment ceux présentant un risque de pathogénicité pour la faune domestique et sauvage.

- Quels sont les effets de paramètres environnementaux (température, hygrométrie, UV, etc.) sur cette cinétique ?
- Cette cinétique est-elle variable selon le stade de développement des animaux ?

- dinde « finition » de 15kg/ volaille finition ou croissance d'1kg ;
- truie de 300kg/ porc à l'engraissement 80kg/ porc post-sevrage 40 kg).

B – Evaluer, en différents sites, les risques liés au stockage en surface des cadavres, sans autre action complémentaire, pendant un délai variable après la mort des animaux (48h, une semaine, deux semaines, un mois) :

- *En élevages* : Les cadavres d'animaux d'élevage sont réglementairement collectés dans un délai de 48 jours francs après l'appel de l'éleveur par l'équarisseur. Néanmoins, lors de circonstances exceptionnelles un retard de collecte peut être constaté entraînant un entassement des cadavres pendant un temps variable.

- *En usines* :

- En situation exceptionnelle, les cadavres peuvent être stockés dans les usines d'équarrissage avant leur transformation.
- Enfin, en cas d'interruption de l'activité de l'usine de transformation suite à une défaillance de ses équipements, il importe de pouvoir gérer ces cadavres en état de décomposition très avancée s'ils ne peuvent être transférés vers un autre site.

C – Evaluer, en fonction des différentes modalités d'enfouissement, les risques de propagation d'agents biologiques de cadavres d'animaux d'élevage (sur site d'élevage, à proximité ou en installation de stockage de déchets non dangereux).

Il est précisé que cette dernière installation est soumise à la réglementation au titre des installations classées pour la protection de l'environnement.

Il conviendra d'évaluer dans quelles circonstances l'utilisation de chaux est nécessaire, en fonction des modalités d'enfouissement possibles. L'utilisation de chaux permet-elle de diminuer le risque de propagation à un niveau faible? Si oui, est-il possible d'estimer la dose de chaux équivalent au poids de cadavres qu'il faudrait utiliser pour atteindre cet objectif?

2- Dans un contexte sanitaire défavorable, évaluation du risque de propagation d'agents pathogènes par enfouissement de cadavres /déchets de venaison

Quel est le risque de diffusion de maladies chroniques et/ou endémiques et/ou à plan d'urgence (fièvre aphteuse, influenza aviaire) aux animaux d'élevage en cas d'enfouissement des cadavres d'animaux d'élevage ou sauvages et/ou déchets de venaison si leur collecte ne peut être assurée? Quelles modalités d'enfouissement préconiser? Outre le fait d'enfouir le cadavre pour éviter son contact avec la faune sauvage, des préconisations particulières devraient-elles être faites?

L'utilisation de chaux peut-elle permettre de diminuer ce risque à un niveau faible? Si oui, est-il possible d'estimer la dose de chaux équivalent au poids de cadavres qu'il faudrait utiliser pour atteindre cet objectif?

Je vous remercie de bien vouloir apporter une réponse à la question 1 d'ici le 15 mai 2020, à la question 2 d'ici le 31 décembre 2020.

Destinataires pour la réponse mail :

Destinataires DGAL : bispe.sdspa.dgal@agriculture.gouv.fr , sdspa.dgal@agriculture.gouv.fr,
christele.mathoniere@agriculture.gouv.fr , saisines-anses.dgal@agriculture.gouv.fr

Mes services se tiennent à votre disposition pour vous apporter toute information complémentaire.
Je vous remercie de bien vouloir accuser réception de la présente demande.

Le Directeur Général de l'Alimentation

Bruno FERREIRA

Annexe 2 : Profil de recherche bibliographique « Chaux »

PARTIE 1 - CADRAGE ET DÉFINITION DU PROFIL

1.1 DÉFINIR LES BESOINS DE RECHERCHE

Ce formulaire permet de tracer l'orientation de la recherche bibliographique, en application de la procédure [ANSES/PR1/9/01] « Organisation de la réalisation d'une expertise en réponse à une saisine ou une auto-saisine » (voir le paragraphe « Collecte des données nécessaires à l'expertise »)

Bases de données (ex : Scopus, PubMed, CAB Abstracts...)	Scopus, WOS	Périmètre	
Mots-clés principaux	Lime, calcium oxyde, cadaver, « carcass disposal », « carcass burial »		
Organismes référents identifiés sur le sujet	DGAL, Union des producteurs de chaux		
Rapports et publications identifiés en amont de la saisine			
Projets de Recherche (APRs Anses, ANR, FP7 etc.)			
Logiciel bibliographique utilisé (ex : EndNote, Zotero)	EndNote (Avez-vous suivi une formation « EndNote » ces 2 dernières années ?) : NON		
Mise en surveillance de sources d'information (veille)	<input type="checkbox"/> OUI <input checked="" type="checkbox"/> NON (Avez-vous suivi la formation « Veille avec les flux RSS » ?) : OUI		

*renseignements des champs obligatoires

Thématique	Mots-clés issus de thésaurus	Autres termes
Population* (ou sujets étudiés)	<i>pig OR swine OR chick OR chicken OR hog OR hen OR beef OR cattle OR bovine OR ruminant* OR livestock OR fish</i>	
Intervention* ciblée : ajout de chaux	<i>lime OR {burnt lime} OR {burned lime} OR {hydrated lime} OR {slaked lime} OR {quick lime} OR {quicklime} OR {lime cast} OR {lime oxide} OR {pebble lime} OR {unslaked lime}) OR {calcium oxyde} OR calciumoxide OR {calcium oxide} OR {calcium monoxide} OR {calcium oxygen(-2) anion} OR {calcium hydroxyde} OR {calcium oxidandiide} OR {ambient alkaline hydrolysis} OR {alkaline hydrolysis} OR caustic)</i>	
Comparateur*		
Outcome* : décomposition, cadavres, enfouissement	<i>cadaver OR carrion OR {carcass burial} OR {livestock burial} OR (Consortium) OR {on-farm burial} OR burial OR waste OR {emergency disposal} OR {infectious animal carcasses} OR deadstock OR {livestock mortalities management} OR {livestock mortality management} OR decomposition OR {sealed ditch} OR biodegradation OR {shallow burial} OR necromass OR {mass graves} OR {differential decomposition} OR desiccation OR corpses OR taphonomy OR microbiology OR inactivation OR forensic)</i>	
Exclusion	<i>biodiesel OR bioethanol OR biobutanol OR manure OR eggshell OR eggshell*</i>	

Pour le détail de la méthode : EFSA (2010). Application of systematic review methodology to food and feed safety assessments to support decision making. *Efsa Journal* 8(6):1637 [doi:10.2903/j.efsa.2010.1637](https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1637)

1.2 STRATÉGIE DE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

REQUÊTES

Pour la recherche bibliographique **il est important de tracer toutes les requêtes opérées**, et de distinguer des grands ensembles qui couvriront les différents axes de la problématique à traiter (ex : ensemble1 Substance **AND** ensemble2)

Requête dans SCOPUS :

Population:

TITLE-ABS-

KEY (*pig OR swine OR chick OR chicken OR hog OR hen OR beef OR cattle OR bovine OR ruminant* OR livestock OR fish*)

Intervention

TITLE-ABS-KEY (*lime OR {burnt lime} OR {burned lime} OR {hydrated lime} OR {slaked lime} OR {quick lime} OR {quicklime} OR {lime cast} OR {lime oxide} OR {pebble lime} OR {unslaked lime}*) OR TITLE-ABS-KEY (*{calcium oxyde} OR calciumoxide OR {calcium oxide} OR {calcium monoxide} OR {calcium oxygen(-2) anion} OR {calcium hydroxyde} OR {calcium oxidandiide} OR {ambient alkaline hydrolysis} OR {alkaline hydrolysis} OR caustic*)

Outcome

TITLE-ABS-KEY (*cadaver OR carrion*)) OR ((TITLE-ABS-KEY (*{carcass burial} OR {livestock burial} OR (Consortium) OR {on-farm burial} OR burial OR waste OR {emergency disposal} OR {infectious animal carcasses} OR deadstock OR {livestock mortalities management} OR {livestock mortality management}*)) OR TITLE-ABS-KEY (*decomposition OR {sealed ditch} OR biodegradation OR {shallow burial} OR necromass OR {mass graves} OR {differential decomposition} OR desiccation OR corpses OR taphonomy OR microbiology OR inactivation OR forensic*)

Exclusion

TITLE-ABS-KEY (*biodiesel OR bioethanol OR biobutanol OR manure OR eggshell OR eggshell**)

Requête: Population AND Intervention AND Outcome AND NOT Exclusion

Requête: (((TITLE-ABS-KEY (*cadaver OR carrion*)) OR ((TITLE-ABS-KEY (*{carcass burial} OR {livestock burial} OR (Consortium) OR {on-farm burial} OR burial OR waste OR {emergency disposal} OR {infectious animal carcasses} OR deadstock OR {livestock mortalities management} OR {livestock mortality management}*)) OR TITLE-ABS-KEY (*decomposition OR {sealed ditch} OR biodegradation OR {shallow burial} OR necromass OR {mass graves} OR {differential decomposition} OR desiccation OR corpses OR taphonomy OR microbiology OR inactivation OR forensic*)))) AND (TITLE-ABS-

KEY (*pig* OR *swine* OR *chick* OR *chicken* OR *hog* OR *hen* OR *beef* OR *cattle* OR *bovine* OR *ruminant** OR *livestock* OR *fish*))
AND ((TITLE-ABS-KEY (*lime* OR {*burnt lime*} OR {*burned lime*} OR {*hydrated lime*} OR {*slaked lime*} OR {*quick lime*} OR {*quicklime*} OR {*lime cast*} OR {*lime oxide*} OR {*pebble lime*} OR {*unslaked lime*}) OR TITLE-ABS-KEY ({*calcium oxyde*} OR *calciumoxide* OR {*calcium oxide*} OR {*calcium monoxide*} OR {*calcium oxygen(-2) anion*} OR {*calcium hydroxyde*} OR {*calcium oxidandiide*} OR {*ambient alkaline hydrolysis*} OR {*alkaline hydrolysis*} OR *caustic*) OR TITLE-ABS-KEY ({*CAS 1305-78-8*} OR {*CAS 1305-62-0*})))) AND NOT (TITLE-ABS-KEY (*biodiesel* OR *bioethanol* OR *biobutanol* OR *manure* OR *eggshell* OR *eggshell**))

Nombre de résultats de la requête dans Scopus + Date de la requête : 336 résultats le 6 juillet 2020

Requête dans Web Of Science

Population:

TITLE-ABS-

KEY (*pig* OR *swine* OR *chick* OR *chicken* OR *hog* OR *hen* OR *beef* OR *cattle* OR *bovine* OR *ruminant** OR *livestock* OR *fish*)

Intervention

TITLE-ABS-KEY (*lime* OR {*burnt lime*} OR {*burned lime*} OR {*hydrated lime*} OR {*slaked lime*} OR {*quick lime*} OR {*quicklime*} OR {*lime cast*} OR {*lime oxide*} OR {*pebble lime*} OR {*unslaked lime*}) OR TITLE-ABS-KEY ({*calcium oxyde*} OR *calciumoxide* OR {*calcium oxide*} OR {*calcium monoxide*} OR {*calcium oxygen(-2) anion*} OR {*calcium hydroxyde*} OR {*calcium oxidandiide*} OR {*ambient alkaline hydrolysis*} OR {*alkaline hydrolysis*} OR *caustic*)

Outcome

TITLE-ABS-KEY (*cadaver* OR *carrion*)) OR ((TITLE-ABS-KEY ({*carcass burial*} OR {*livestock burial*} OR (*Consortium*) OR {*on-farm burial*} OR *burial* OR *waste* OR {*emergency disposal*} OR {*infectious animal carcasses*} OR *deadstock* OR {*livestock mortalities management*} OR {*livestock mortality management*}) OR TITLE-ABS-KEY (*decomposition* OR {*sealed ditch*} OR *biodegradation* OR {*shallow burial*} OR *necromass* OR {*mass graves*} OR {*differential decomposition*} OR *desiccation* OR *corpses* OR *taphonomy* OR *microbiology* OR *inactivation* OR *forensic*)

Exclusion

TITLE-ABS-KEY (*biodiesel* OR *bioethanol* OR *biobutanol* OR *manure* OR *eggshell* OR *eggshell**)

Requête: Population AND Intervention AND Outcome AND NOT Exclusion

Requête: (((TITLE-ABS-KEY (*cadaver* OR *carrion*)) OR ((TITLE-ABS-KEY ({*carcass burial*} OR {*livestock burial*} OR {*Consortium*} OR {*on-farm burial*} OR *burial* OR *waste* OR {*emergency disposal*} OR {*infectious animal carcasses*} OR *deadstock* OR {*livestock mortalities management*} OR {*livestock mortality management*}) OR TITLE-ABS-KEY (*decomposition* OR {*sealed ditch*} OR *biodegradation* OR {*shallow burial*} OR *necromass* OR {*mass graves*} OR {*differential decomposition*} OR *desiccation* OR *corpses* OR *taphonomy* OR *microbiology* OR *inactivation* OR *forensic*)))) AND (TITLE-ABS-KEY (*pig* OR *swine* OR *chick* OR *chicken* OR *hog* OR *hen* OR *beef* OR *cattle* OR *bovine* OR *ruminant** OR *livestock* OR *fish*)) AND ((TITLE-ABS-KEY (*lime* OR {*burnt lime*} OR {*burned lime*} OR {*hydrated lime*} OR {*slaked lime*} OR {*quick lime*} OR {*quicklime*} OR {*lime cast*} OR {*lime oxide*} OR {*pebble lim* OR {*unslaked lime*}) OR TITLE-ABS-KEY ({*calcium oxyde*} OR *calciumoxide* OR {*calcium oxide*} OR {*calcium monoxide*} OR {*calcium oxygen(-2) anion*} OR {*calcium hydroxyde*} OR {*calcium oxidandiide*} OR {*ambient alkaline hydrolysis*} OR {*alkaline hydrolysis*} OR *caustic*) OR TITLE-ABS-KEY ({*CAS 1305-78-8*} OR {*CAS 1305-62-0*})))) AND NOT (TITLE-ABS-KEY (*biodiesel* OR *bioethanol* OR *biobutanol* OR *manure* OR *eggshell* OR *eggshell**))

Nombre de résultats de la requête dans Web Of Science + Date de la requête : 222 résultats le 6 juillet 2020

Nombre de résultats de la requête après suppression des doublons éventuels avec la requête précédente :461

Analyse des résultats obtenus : 461

PARTIE 2 – RECOMMANDATIONS POUR LA RESTITUTION DE LA STRATÉGIE DE RECHERCHE

Les éléments ci-dessous, avec deux options possibles, guident les modalités d'explicitation de la stratégie de recherche au niveau du produit d'expertise ou d'appui scientifique et technique.

2.1 DIAGRAMME PRISMA

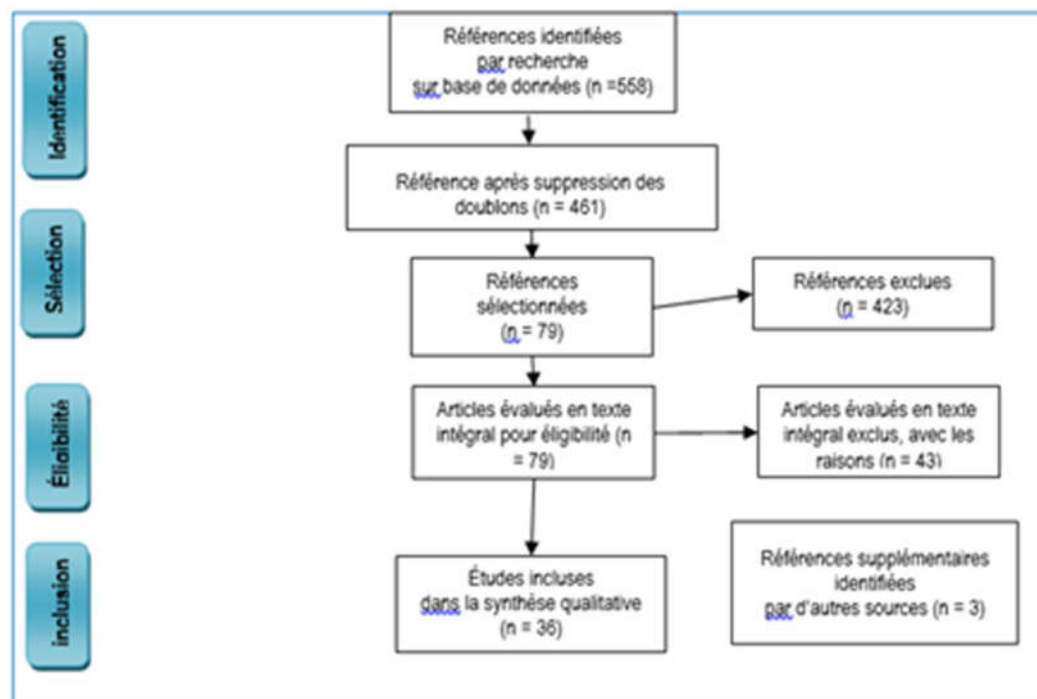


Figure 1 : Gedda M. (2015). Traduction française des lignes directrices PRISMA pour l'écriture et la lecture des revues systématiques et des méta-analyses. *Kinésithérapie* 15(

Gedda M. (2015). Traduction française des lignes directrices PRISMA pour l'écriture et la lecture des revues systématiques et des méta-analyses. *Kinésithérapie* 15(157):39-44.
[doi:10.1016/j.kine.2014.11.004](https://doi.org/10.1016/j.kine.2014.11.004)

Annexe 3 : Grille de lecture recherche bibliographique « chaux » (extrait)

AUTEURS	ANNEE	TITRE	Type d'étude: labo terrain autre (revues, synthèse, etc.)	Animaux ciblés: cadavres petits mammifères (:lièvre) cadavres grands mammifères oiseaux déchets (venaison ou autres) poissons autres NA	Détailler: espèces, poids individuel et total, etc.	Autres matrices ciblées fumier lisier matrices inertes autres NA	Détailler si nécessaire	Type de substance chaux vive seule chaux hydratée seule chaux vive et chaux hydratée autres substances seule ou en combinaison avec chaux	Détailler	Objectifs du traitement effets sur la décomposition nuisances biocides éloignement des nérophages autre	Article en adéquation avec la question de la saisine oui non	Description des modalités d'utilisation oui non
A. A. Ammann, I.; Zahner- Rimmel, P.; Mietzko, A.; Jordan, L. K.; Oberle, M.; Vedekind, H.; Christian, J.; Bergmann, S. M.; Becker, A. M.	2020	Virucidal effects of various agents, including protease-against koi herpesvirus and viral haemorrhagic septicaemia virus	labo	NA		matrices inertes	milieu de culture avec ou sans sable	chaux vive		biocides	non	oui
J. P. Bauza-Kaszewska, Z.; Skowron, K.	2014	Viability of Clostridium sporogenes spores after CaO hygienization of meat waste	labo	déchets	sous-produits cat. 3 (volailles)	autres	sous-produits cat. 3 (volailles)	chaux vive	CaO	biocides	oui	oui
M. M. R. Cavalcanti, M. P.; Blum, M. L. B.; Borges, V. R.	2019	The forensic geophysical controlled research site of the University of Brasília, Brazil: Results from methods GPR and electrical resistivity tomography	autre	grands mammifères	porc	NA		chaux hydratée		autres	non	non
S. K. Chowdhury, G. H.; Bolan, N.	2019	A critical review on risk evaluation and hazardous management in carcass burial	autre	autres	Toutes espèces	autres	Carcasses/déchets	chaux vive et chaux hyd	Seuls détails por	effets sur la décomposition	oui	oui
J. C. B. Costa, S. G.; Sousa, D. J.	2012	Effects of pre-treatment and bioaugmentation strategies on the anaerobic digestion of chicken Lime treatment of keratinous materials for the generation of highly digestible animal feed: 2. Animal hair	labo	autres	seulement les plumes de poulets	fumier	Litière et plumes d'an	chaux vive	Appliquée à déter	effets sur la décomposition	oui	oui
G. A. Coward-Kelly, F. K.; Holtz	2006		labo	autres	Poils de vache	autres	plumes de poulet	chaux hydratée		effets sur la décomposition	oui	oui

Annexe 4 : Recherches bibliographiques « enfouissement »

Différentes requêtes ont été menées dans la base de données Scopus®. Elles sont listées ci-dessous :

- decomposition AND {animal carcasses}: 120 références le 14/01/2020 puis réactualisation le 20/03/2020 : 199 références
- burial AND (Consortium): 96 références le 14/01/2020 puis réactualisation le 20/03/2020: 97 références
- TITLE-ABS-KEY (*carcass*) AND TITLE-ABS-KEY (*lime*) AND TITLE-ABS-KEY (*burial*): 9 références le 21/01/2020 puis réactualisation le 25/03/2020: 9 références
- {Foot and mouth} AND (Consortium): 98 références le 13/02/2020 puis réactualisation le 26/03/2020 : 98 références
- {Forensic microbiology}: 144 références le 12/03/2020 puis réactualisation le 26/03/2020 : 147 références

Annexe 5 : Grille de lecture recherche bibliographique « Enfouissement » (extrait)

AUTEURS	ANNEE	TITRE	JOURNAL	EXPERT	Type d'étude: labo terrain autre (revues, synthèse, etc.)	Résumé très succinct (si possible une phrase)	informations supplémentaires sur le dispositif expérimental (si étude labo/terrain) dans les grandes lignes	résultat / ccl
Aneyo	2020	Aerobic microbe community and necrophagous insects associated with decomposition of pig carrion poisoned with lead	Legal medicine	HJ Boulouis	terrain	étude de la flore aérobie et des insectes pendant 40 jours de décomposition de porc posés sur le sol et rôle de la contamination des aliments de ces porcs par du plomb sur cette décomposition. Utilisation potentielle dans la détermination de l'intervalle post-mortem	sol prélevé (19, 21, 28, 35 and 53) sous les carcasses (différents points). Numération et identification biochimique de 40 colonies environ. Culture/comptage des champignons	Variété des populations microbiennes en particulier en fonction de la période de décomposition
Arias	2018	Ambient alkaline hydrolysis and anaerobic digestion as a mortality management strategy for whole poultry carcasses	Waste Management	HJ Boulouis	terrain	effet de l'hydroxyde de potassium (2, 4 et 8M) sur la solubilisation des carcasses de poulet	température et pression ambiante ; container ; neutralisation ensuite par de l'ensilage de maïs ;	La solubilisation des carcasses est obtenue en 20 jours. Production de méthane pendant 40j de neutralisation
Baba	2017	Traditional methods of carcass disposal: a review	Journal of dairy, veterinary et animal research	HJ Boulouis	revue	Production avicole en Inde (œufs et poulets)		
Beans	2018	Can microbes keep times for forensic investigations?	Proceedings of the national academy of science	HJ Boulouis	"revue", "article de vulgarisation"	la succession des micro organismes peut jouer le rôle d'horloge et peut permettre de déterminer le jour de la mort d'un individu (avant ou après 48h)	6 références d'intérêt et commentées	Chronologie de l'apparition des germes
Benninger	2008	The biochemical alteration of soil beneath a decomposing carcass	Forensic science international	HJ Boulouis	terrain	Dynamique des composés C, N et P dans le sol sous des cadavres de porcs sur une période de 100 jours		Intérêt de ces dosages pour l'estimation de la date de la mort
Bergmann	2014	An RNA-based analysis of changes in biodiversity indices in response to <i>Sus scrofa domestica</i> decomposition	Forensic science international	HJ Boulouis	terrain	Etude de la flore de décomposition par 16S rRNA dans des prélèvements de sol sous une patte de porc en décomposition	prélèvement à 3, 28 and 77 jours et à trois distances du membre	Modifications entre les points de prélèvement

AUTEURS	ANNEE	TITRE	JOURNAL	EXPERT	Pour partie = Décomposition d'un cadavre et impact de différents facteurs? (oui/non/peut-être)	Pour partie = Description des modalités de stockage des cadavres et contraintes? (oui/non/peut-être)	Pour partie Risques & enjeux liés à la gestion, notamment risques sanitaires & environnementaux? (oui/non/peut-être)	Commentaires	A exclure après lecture complète (oui/non)
Aneyo	2020	Aerobic microbe community and necrophagous insects associated with decomposition of pig carrion poisoned with lead	Legal medicine	HJ Boulouis	oui	non	oui		non
Arias	2018	Ambient alkaline hydrolysis and anaerobic digestion as a mortality management strategy for whole poultry carcasses	Waste Management	HJ Boulouis	oui	non	peut-être	très chimique / méthane	non
Baba	2017	Traditional methods of carcass disposal: a review	Journal of dairy, veterinary et animal research	HJ Boulouis	non	non	non	ne concerne que la production avicole en Inde...	oui
Beans	2018	Can microbes keep times for forensic investigations?	Proceedings of the national academy of science	HJ Boulouis	oui	non	non		non
Benninger	2008	The biochemical alteration of soil beneath a decomposing carcass	Forensic science international	HJ Boulouis	non	non	peut-être		non
Bergmann	2014	An RNA-based analysis of changes in biodiversity indices in response to sus scrofa domesticus decomposition	Forensic science international	HJ Boulouis	oui	non	peut-être		non



anses

CONNAÎTRE, ÉVALUER, PROTÉGER

AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE
de l'alimentation, de l'environnement et du travail

14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex
Tél : 01 42 76 40 40
www.anses.fr — @Anses_fr