
Conversion aérobie des dépouilles :

Validation méthodologique

Rapport final

Auteurs : Adrien Dockx, Rémi Desmet & Philippe Baret

Avec le soutien de
la



Wallonie

Travaux menés dans le cadre de la convention d'étude sur l'Humusation établie entre le Ministre wallon de l'Environnement et l'Université catholique de Louvain.

Table des matières

Préface	4
1. Expérience 1 : humusation dans un matériau riche en carbone	5
1.1 Matériel et méthode	5
1.2 Résultats	6
1.3 Discussion	9
1.4 Pistes de réflexion	11
2. Expérience 2 : adaptation du mode opératoire sur base des résultats de l'expérience 1	12
2.1 Matériel et méthode	13 12
2.2 Résultats	14 13
2.3 Discussion	15
3. Impact sur les sols et qualité du compost	17
3.1 Résultats	17
3.2 Discussion	18
4. Conclusion	20
Bibliographie	21

Préface

Parmi les méthodes de traitement des dépouilles les plus répandues dans nos régions, la crémation et l'inhumation posent actuellement question quant à leurs impacts sur l'environnement (Guttman, Watson et Miller 2011).

La crémation peut provoquer le rejet dans l'atmosphère de dérivés de mercure toxiques, issus des amalgames dentaires, et est énergétiquement coûteuse. La pollution des eaux (bactéries...) et des sols (métaux lourds issus des cercueils) peut subvenir en cas de mauvaise gestion de l'inhumation (Vaezihir et Mohammadi 2016) (Jonker et Olivier 2012).

Les enjeux ne sont pas uniquement environnementaux, mais touchent également la gestion du parc funéraire, le respect des croyances et des dépouilles, etc.

Dans ce contexte, divers procédés alternatifs sont actuellement à l'étude dans le monde, parmi lesquels :

- La resomation par immersion dans une solution alcaline chauffée durant plusieurs heures ;
- La cryomation ou promession, procédé consistant en une congélation, réduction en poudre et lyophilisation ;
- L'inhumation écologique via un processus de décomposition naturel (contenant et fibres biodégradables).

Une autre approche, l'humusation, vise à convertir les dépouilles en compost en présence d'oxygène et de matière compostable. Dans sa version « industrielle », le procédé est déjà appliqué aux Etats-Unis, dans des tours de compostage verticales avec une ventilation forcée (Kiley 2019) (Devault-Weaver 2020). Les tours sont alimentées par le haut et le compost et les os sont récupérés au bas. Une part symbolique du compost peut ensuite être récupérée par les proches. Les ossements, peu affectés par ce procédé, sont broyés.

Le pendant « naturel » de cette technique est l'objet du présent document. Il s'agit d'inhumer la dépouille dans une butte de matière compostable, d'origine animale ou végétale.

Dans le cadre de la convention entre l'UCL et la Direction Générale du SPW-Développement durable, la présente étude a pour but d'investiguer, d'un point de vue scientifique, le potentiel de l'humusation naturelle dans la gestion des dépouilles humaines. Le dossier constitué pourrait être un préalable pour une demande d'expérimentation sur dépouilles humaines.

Par rapport aux procédés industrialisés présentés plus haut, l'enjeu de l'humusation naturelle est triple :

- L'inhumation dans des matériaux naturels, en contact avec le sol prend tout son sens dans l'idée d'un « Retour à la Terre » ;
- De consommatrice de ressources, la gestion des dépouilles devient productrice de compost ;
- Aspect esthétique de l'humusation naturelle en buttes.

Dans ce contexte, le présent projet de recherche vise à donner des éléments de réponse sur les questions suivantes :

- Quelle est la faisabilité technique de conversion aérobie (compostage) des dépouilles dans sa version biologique ou naturelle ?
- Quelles sont les modalités pratiques permettant la mise en place de ce compostage ?
- Quels sont les impacts sur l'environnement ?

Cette étude a été réalisée en deux séries d'expériences sur des carcasses de porcs. La première série d'expériences a été menée lors de la saison 2018-2019, la seconde durant la saison 2019-2020.

1. Expérience 1 : humusation dans un matériau riche en carbone

1.1 Matériel et méthode

Le protocole de la première série d'expériences est basé sur le livre « Plaidoyer pour l'Humusation » (Fondation "Métamorphose" 2017). Pour validation, plusieurs ressources documentaires traitant du compostage de carcasses d'animaux en Amérique du Nord ont également été consultées. Cette méthode est utilisée de façon régulière dans les exploitations agricoles (Desrochers 2014) (Hawkins 2019). Bonhotal et al. (Bonhotal, Schwarz et Rynk 2014) proposent une vue d'ensemble des méthodes et conditions de compostage.

Deux porcs de poids différents ont été compostés durant la période hivernale, l'un au niveau du sol et l'autre dans une fosse. L'objectif de la modalité en fosse est de se rapprocher au maximum des conditions légales actuelles (inhumation des corps à 2m de profondeur). Un troisième édicule de compostage, sans porc, a été installé pour servir de témoin.

Le matériau compostable utilisé est un broyat de type BRF (Bois Raméal Fragmenté). Le rapport Carbone/Azote (C/N) de ce type de matériau varie entre 100 :1 et 1000 :1, alors que le rapport C/N des carcasses d'animaux est proche de 7 :1 (Leblanc et Pigeon 2009). Bonhotal et al. recommandent l'utilisation d'un matériau dont le rapport C/N est supérieur à 40 :1 afin de fournir le carbone nécessaire au compostage (Bonhotal, Schwarz et Rynk 2014). Le BRF, relativement grossier, permet également la circulation de l'air dans le tas.

Les dépouilles, enveloppées dans un linceul biodégradable, ont été déposées sur une couche de broyat de 20 cm d'épaisseur environ puis recouvertes par 3-4m³ de broyat humidifié. Un grillage a ensuite été disposé autour des buttes afin de les protéger des animaux ([Figure 1](#)).

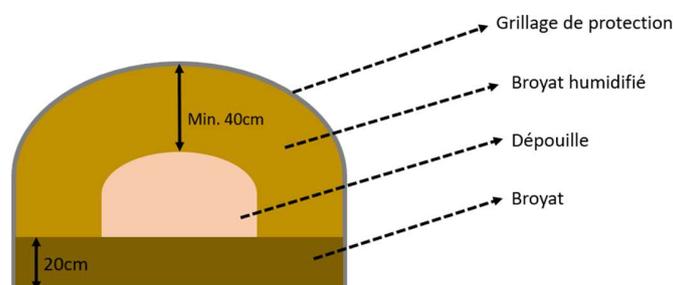


Figure 1: Vue en coupe d'une butte de la première expérience.

Après inhumation, les buttes seront laissées sans intervention pour une durée totale de 3 à 4 mois. Cela correspond aux recommandations de la Fédération des producteurs de porcs du Québec (Leblanc et Pigeon 2009), qui suggèrent une durée de 6 à 12 semaines sans intervention pour un compostage en cellule.

Ensuite, les os seront récupérés, broyés et réintégrés au tas pour une durée supplémentaire de 12 mois pour maturation du compost (Bonhotal, Schwarz et Rynk 2014).

Au cours de la saison 2018-2019, l'évolution des températures a été suivie à l'aide de sondes introduites dans les porcs et au centre des tas. Des observations visuelles et olfactives hebdomadaires ont également été réalisées.

Tableau 1: Détail des modalités de l'expérience 1

	Porc	Broyat végétal (BRF)
Butte Témoin	NON	OUI
Butte Humusation sur sol	OUI	OUI
Butte Humusation en fosse	OUI	OUI

1.2 Résultats

Evolution des températures

La figure 1 présente l'évolution des températures mesurées pour les différentes modalités étudiées. La température de l'air à 1,3 m du sol est elle aussi représentée. Sur base de cette figure, nous pouvons observer que les trois modalités présentent des schémas d'évolution différents.

Le compost témoin montre une température pratiquement constante (aux alentours de 15°C) tout au long de l'expérience. Cela dit, on peut observer une légère augmentation au-delà des 20°C lors de l'épisode climatique de redoux qui a eu lieu entre 9 et 11 semaines après la mise en place du dispositif.

Le compostage sur sol (humusation) présente une montée en température durant 7 semaines avec un maximum atteignant 38°C. Dans le cas de cette modalité, on observe une seconde montée en température qui coïncide, ici aussi, avec l'épisode de redoux.

Le compostage en fosse a montré une montée en température plus marquée qui a duré 4,5 semaines et atteint 60°C. Cette montée a été suivie d'une diminution durant 4 semaines et menant la température du tas à 10°C. Dans ce cas-ci aussi, nous avons pu observer une seconde montée en température initiée au moment du redoux.

Observations visuelles et olfactives

Aucune particularité visuelle ou olfactive n'a pu être observée en ce qui concerne le compost témoin. Cela dit, la fonte de la neige (présente les semaines 6 et 7) a permis de détecter un dégagement de chaleur au sommet du tas.

Pour ce qui concerne le compostage sur sol (humusation), des fissures sont apparues au sommet du tas 3,5 semaines après le début de l'expérience mais sans affecter la stabilité de l'édicule. La fonte de

la neige lors de la présence du tapis neigeux a ici aussi montré le dégagement de chaleur au sommet du tas. Nous avons aussi remarqué une légère odeur de décomposition lors de la 7^{ème} semaine. Ce moment correspond au premier pic de température pour cette modalité (Fig. 1). De plus, le sommet du tas est apparu plus humide lors de la 11^{ème} semaine ce qui correspond au 2^{ème} pic de température

Dans le cas du compostage en fosse, des fissures sont aussi apparues au sommet du tas rapidement après le début de l'expérience mais dans ce cas-ci la stabilité de l'édicule n'a pas non plus été affectée. La fonte de la neige lors de la présence du tapis neigeux (6^{ème} et 7^{ème} semaines) a indiqué, ici aussi, un dégagement de chaleur au sommet du tas.

Cette observation est renforcée par la présence de vapeur se dégageant des fissures. Ce dégagement s'est poursuivi jusqu'à la 5^{ème} semaine, ce qui correspond au premier pic de température pour cette modalité (fig 1.). Dans ce cas-ci, le compostage s'est accompagné d'une odeur de décomposition entre la 2^{ème} et la 7^{ème} semaine. Il est aussi important de noter que la fosse a eu tendance à se remplir d'eau (jusqu'à 20-30 cm) en fonction des conditions climatiques (pluie et neige).

Les porcs ayant été inhumés le 17 décembre 2018, l'ouverture des tas a eu lieu le 20 mars 2019 après 13,5 semaines sans intervention. A l'ouverture des tas, les carcasses étaient blanchâtres, d'aspect gras et peu décomposées, signe de saponification. La saponification est la transformation des lipides en savons insolubles, induite par la libération d'ammoniaque lors de la dégradation des protéines. Cette réaction est favorisée en absence d'oxygène (Schotsmans, Márquez-Grant et Forbes 2017) (Wilson, et al. 2007).

La décomposition des carcasses étant incomplète, il a été décidé de ne pas poursuivre cette première expérience.

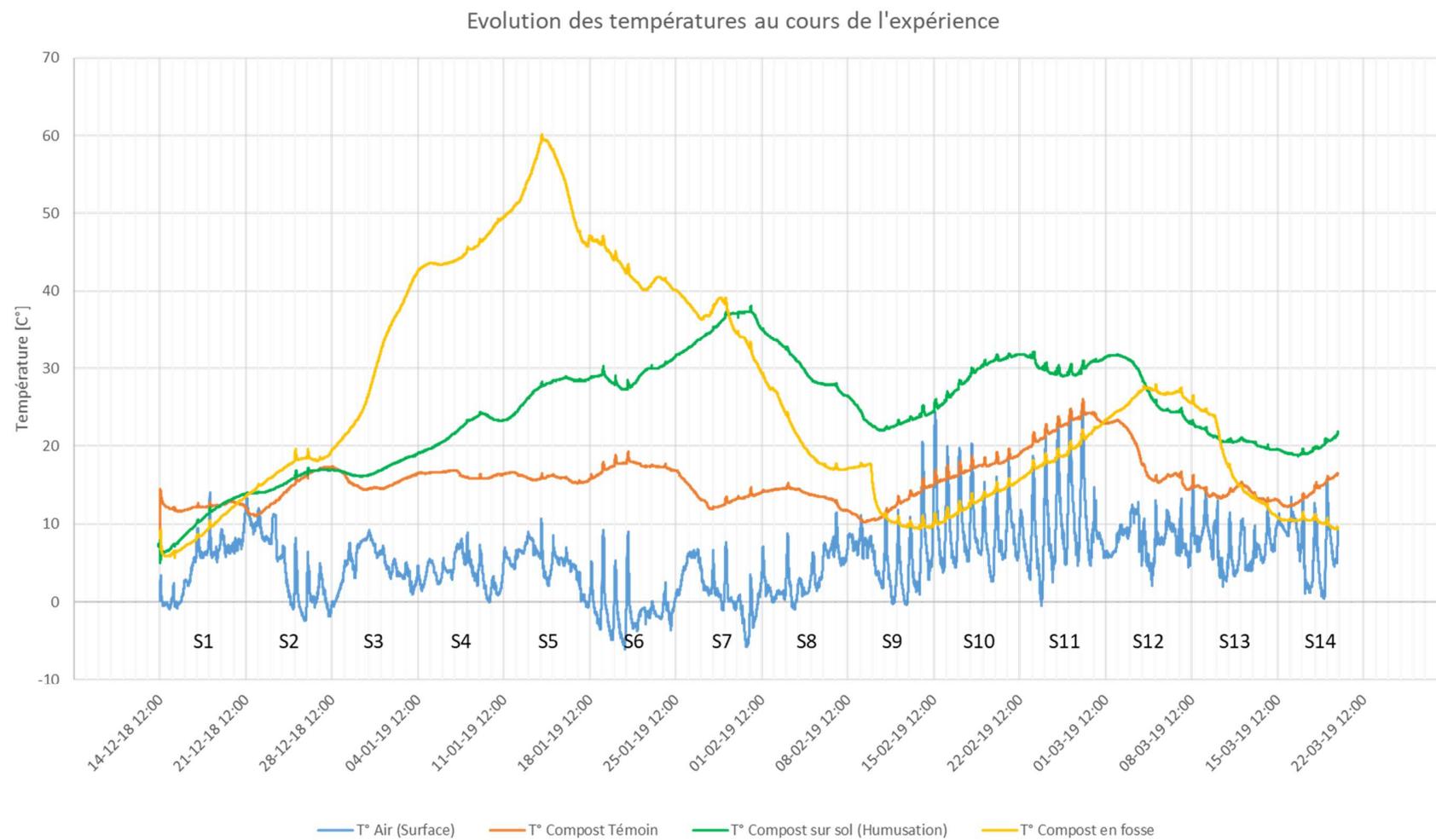


Figure 2: Evolution des températures au cours de l'expérience pour les différentes modalités étudiées

1.3 Discussion

Les conditions extérieures ont un impact sur le compostage

La mise en relation de l'évolution des températures pour les différentes modalités et des conditions climatiques observées permet d'émettre des hypothèses sur l'influence de ces dernières.

Premièrement, les conditions observées durant la mise en place de l'expérience étaient particulièrement froides. En effet, les cochons ont été réfrigérés à 6°C. L'eau de pluie utilisée présentait une température de 0°C et la température extérieure était de 2°C. Cela dit, nous pouvons observer que cela n'a pas empêché les deux modalités comportant les dépouilles de présenter une montée en température.

Deuxièmement, en ce qui concerne le déroulement de l'expérience, on peut s'intéresser à trois paramètres : la température, les précipitations et le vent.

La température semble avoir une influence significative sur le déroulement du compostage pour les trois modalités. En effet, on peut observer sur la figure 1, lors de l'épisode de redoux des 9^{ème} à 11^{ème} semaines, une augmentation de la température des tas qui concorde avec l'augmentation des pics de températures de l'air. Il semble donc que la température de l'environnement stimule le processus de compostage.

Pour ce qui est des précipitations, nous voyons que, dans le cas du compostage en fosse, la chute brutale de la température du tas observée la 9^{ème} semaine coïncide avec l'observation d'une quantité d'eau importante dans la fosse. Cette présence d'eau a donc probablement bloqué le processus de compostage.

Le paramètre vent est plus difficile à cerner. Les observations que nous avons pu faire durant l'épisode de tempête des semaines 12 et 13 semble indiquer qu'il coïncide avec la chute de la température des tas mais il est difficile de se positionner sur ce point. En effet, cet épisode était accompagné de fortes précipitations.

La structure des tas n'a pas permis une ventilation suffisante

En règle générale, le compostage permet d'atteindre facilement des températures de l'ordre de 50 à 70 degrés pendant une dizaine de jours. Les modalités étudiées lors de notre expérience n'ont pas présenté ce schéma classique malgré le pic observé pour le compostage en fosse. Cette montée en température est importante pour garantir une bonne décomposition et une hygiénisation du contenu (voir point suivant).

Notre hypothèse face à cette faible montée en température est que l'aération insuffisante des tas n'a pas permis au processus biologique de se dérouler dans des conditions optimales. En effet, dans le cas des modalités qui ont été testées lors de notre expérience, aucun retournement n'a été pratiqué. De plus, la composition du tas était uniquement basée sur du Bois Raméal Fragmenté (BRF) humidifié ce qui a pu empêcher une bonne circulation passive de l'air.

Lors d'un processus de compostage « classique », le retournement du tas permet son aération, garantissant ainsi une décomposition aérobie rapide et une flexibilité sur la composition et la structure du tas qu'il est nécessaire de mettre en place. L'aération est aussi préconisée par les professionnels de

l'élevage porcin au Québec (Desrochers 2014) dans le cas du compostage des dépouilles animales. En effet, ceux-ci conseillent l'utilisation d'andains avec retournement ou d'un bioréacteur à rotation afin de garantir une oxygénation et une homogénéisation du contenu.

Ces informations nous permettent aussi de proposer une explication à la montée en température que nous avons tout de même observée. En effet, on peut supposer que le gonflement du cadavre provoqué par les micro-organismes endogènes dans les premiers stades de la décomposition a entraîné l'effondrement du sommet du tas et l'apparition des fissures qui ont été observées. Ces fissures ont permis l'entrée d'air dans le tas et ainsi initié le processus de décomposition aérobie. Cela dit, on peut supposer que cette entrée d'air n'a pas suffi à permettre au processus de pleinement se réaliser.

La composition du matériau compostable peut être optimisée

Si le manque de ventilation semble constituer un frein important à la montée en température des tas et au bon déroulement du compostage, la faible montée en température des tas au début de l'expérience, quand l'oxygène piégé dans les buttes n'est pas encore consommé, semble également indiquer que le BRF utilisé n'est pas idéal pour le compostage.

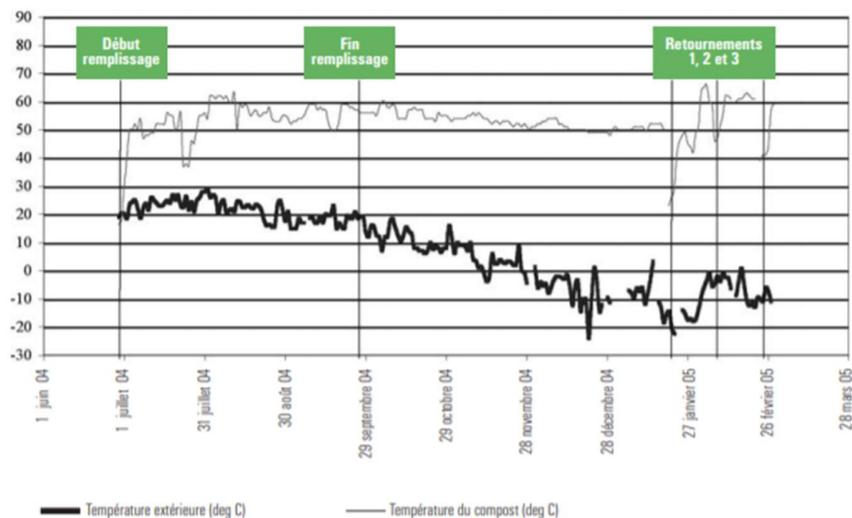


Figure 3: Variation typique de la température en cours de compostage (Pigeon, Boutin et Leblanc 2006).

En effet, les courbes de température observées lors du compostage d'animaux présentent généralement une montée en température rapide et marquée (Figure 3) (Pigeon, Boutin et Leblanc 2006).

La raison est sans doute que le BRF d'hiver utilisé est pauvre en azote. En vue d'atteindre un rapport C/N optimal pour le compostage, l'ajout de matière azotée au BRF peut être envisagé.

Les températures atteintes dans ces conditions expérimentales ne sont pas suffisantes pour hygiéniser le contenu des tas

La méthode principale permettant d'évaluer la destruction des pathogènes lors d'un processus de compostage est l'analyse du couple température - durée. La littérature fournit les informations présentées dans le [Tableau 2](#) (Feix et Wiart 1998) (ADEME - Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie 2001) (CNIEL - Centre national interprofessionnel de l'économie laitière 2010).

Tableau 2: Couples température-durée et leur efficacité en termes d'hygiénisation

Température	Durée minimale	Efficacité	Classification
40°C	15-30 jours	Faible à Moyenne	Compostage à faible température
55°C	10 jours	Moyenne Hygiénisation des salmonelles	Stabilisation thermophile
56°C-60°C	15-30 jours	Bonne à Excellente	Compostage « bien conduit »
60°C	10 jours	Bonne à Excellente Hygiénisation des entérovirus	
70°C	10 heures	Excellente Hygiénisation des œufs d'Helminthes	Pasteurisation

Sur base de ces informations, aucune des modalités étudiées n'atteint une hygiénisation satisfaisante. En effet, seul le compostage en fosse a dépassé les 40°C. Cela dit, la durée de 3 semaines à cette température le classe dans la catégorie « compostage à faible température ». Il ne présente donc qu'une hygiénisation faible à moyenne.

1.4 Pistes de réflexion

Une température extérieure plus élevée

Notre expérience a été réalisée durant l'hiver et il serait intéressant de posséder des informations en ce qui concerne la période estivale.

En effet, on peut supposer que l'hiver ne présente pas des températures favorables au déroulement du processus. Cela dit, elles permettent de limiter les risques d'odeurs de décomposition. A l'inverse, l'été présente des températures optimales mais augmente aussi la probabilité d'observer des odeurs désagréables.

Cela dit, le travail sur l'humusation doit permettre la définition d'un protocole garantissant une décomposition optimale des dépouilles été comme hiver tout en supprimant les odeurs.

Améliorer l'aération des tas

Comme nous l'avons vu, les modalités étudiées ne semblent pas avoir permis une aération optimale du tas et il est donc important de se pencher sur cette question. Le processus d'humusation ne permet pas une oxygénation par retournement et il n'y a donc que deux autres possibilités qui peuvent être explorées afin d'améliorer la méthode : la composition du tas et sa ventilation.

La composition du tas doit être réfléchi afin de permettre une circulation passive de l'air durant tout le processus. Il est donc important de travailler sur un mélange basé sur la combinaison entre des éléments plus grossiers (ex : morceaux de bois) et des éléments plus fins (ex : terreau, compost). Les premiers permettent un maintien de la stabilité structurale du tas et les seconds ont pour fonction de combler la porosité, stimuler la décomposition et absorber les liquides et odeurs.

Afin de garantir une oxygénation du tas, il serait également possible de mettre en place un système de ventilation artificiel de l'édicule. Dans ce cas, deux approches existent : la ventilation passive ou la ventilation active.

Dans le cas de la ventilation passive, il s'agit de permettre l'accès de manière passive à l'air jusqu'au centre du tas via la réalisation de trous ou l'installation de tuyaux. C'est notamment le cas, dans les travaux réalisés par la FAO sur les méthodes de compostage « rapides et à haute température » (FAO 2005).

Pour ce qui est de la ventilation active, le principe est le même mais l'air est injecté dans l'édicule à l'aide d'un système de ventilation. C'est le principe qui est en réflexion aux USA pour le compostage de dépouilles humaines dans le cadre de l'« Urban Death Project » de l'entreprise Recompose (Ross 2016).

Dans le cadre de la présente convention, la ventilation artificielle des tas est en opposition avec les enjeux présentés dans la Préface. Il a donc été décidé d'exclure l'utilisation de matériel autre qu'issu de sources animales ou végétales.

Optimiser le rapport C/N des matériaux composant les tas

Pour atteindre un C/N moyen de 40 :1, l'option la plus simple serait d'utiliser du BRF « vert », contenant des feuilles, ou de le mélanger à de l'herbe de tonte. Cependant, ces matériaux ne sont pas disponibles en toute saison et ne permettraient pas d'établir un protocole unique et reproductible.

L'autre possibilité est d'adapter le rapport C/N en ajoutant des fumures animales, soit sous forme « brute » soit en granulés. Les granulés présentent l'avantage de pouvoir être conservés plus facilement, et le fait qu'ils soient transformés les rend plus neutres en termes d'image que la fumure organique « brute ».

2. Expérience 2 : adaptation du mode opératoire sur base des résultats de l'expérience 1

Les conditions de l'expérience 1 n'ayant pas permis de mener à bien l'humusation naturelle, il a été convenu d'adapter le protocole sur base des discussions et pistes de réflexion proposées au point précédent. Une réunion avec la Fondation Métamorphose a également été organisée le 20 septembre 2019 pour définir le protocole.

Le protocole a ensuite été validé par les différentes parties en comité d'accompagnement (12 décembre 2019) et la mise en place du test a eu lieu le 17 décembre 2019.

2.1 Matériel et méthode

Le protocole complet est présenté dans l'annexe 2019_12_09_Humusation_Protocole2. Nous décrivons ici les différences apportées par rapport au protocole de l'expérience 1.

Premièrement, la composition des buttes a été modifiée. Les carcasses ont été déposées sur une couche de broyat de 20 cm d'épaisseur non saturé en eau. Ensuite, 2.5m³ de broyat végétal ont été disposés par-dessus puis humidifiés à l'eau de distribution à raison de 150l/m³. La saturation moindre en eau a pour but d'améliorer la circulation de l'air dans le tas.

Par rapport au BRF de l'expérience 1, le Broyat végétal contient d'avantage d'azote. Une analyse du rapport C/N sera effectuée avant la mise en place de l'expérience, et du fumier en granulés sera ajouté au tas pour corriger le rapport C/N si nécessaire, afin que ce dernier soit compris entre 50 :1 et 30 :1, comme cela a été établi dans l'annexe 2019_12_09_Humusation_Protocole2.

Les buttes ainsi formées ont été recouvertes par 15cm de paille pour lutter contre le dessèchement par l'action du vent, puis par un grillage de protection (Figure 4).

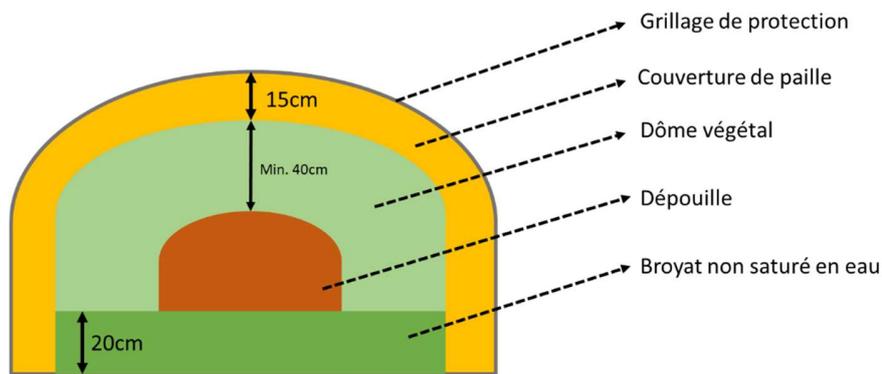


Figure 4: Vue en coupe d'une butte de la seconde expérience.

Il a également été décidé de tester l'action du charbon sur le compostage. Ce matériaux poreux et broyé finement a pour but de favoriser la fixation de bactéries aérobies et ainsi d'améliorer la qualité du compost produit (après maturation). 120 kg de charbon ont été ajoutés par tas pour les modalités concernées.

Tableau 3: Composition des modalités de l'expérience 2.

	Porc	Broyat végétal + fumier en granulés	Charbon de bois en poudre
Butte Témoin	NON	OUI	NON
Butte Témoin + charbon	NON	OUI	OUI
Butte Humusation	OUI	OUI	NON
Butte Humusation + charbon	OUI	OUI	OUI

De la même manière que pour l'expérience 1, la température des tas a été suivie tout au long de l'expérience via des sondes placées au centre des tas ou dans les porcs. Les prélèvements de sol ont eu lieu le lendemain de l'ouverture des tas (1 répétition par tas). Deux échantillons de compost ont été prélevés par tas, un de chaque côté des tas dans le sens de la longueur.

2.2 Résultats

Rapport C/N du Broyat végétal

Les analyses du broyat végétal (5 prélèvements, 2 mesures par prélèvement) donnent une valeur moyenne de C/N de 26,81 :1, ce qui est suffisamment proche de l'objectif de 30 :1 à 50 :1.

Evolution des températures

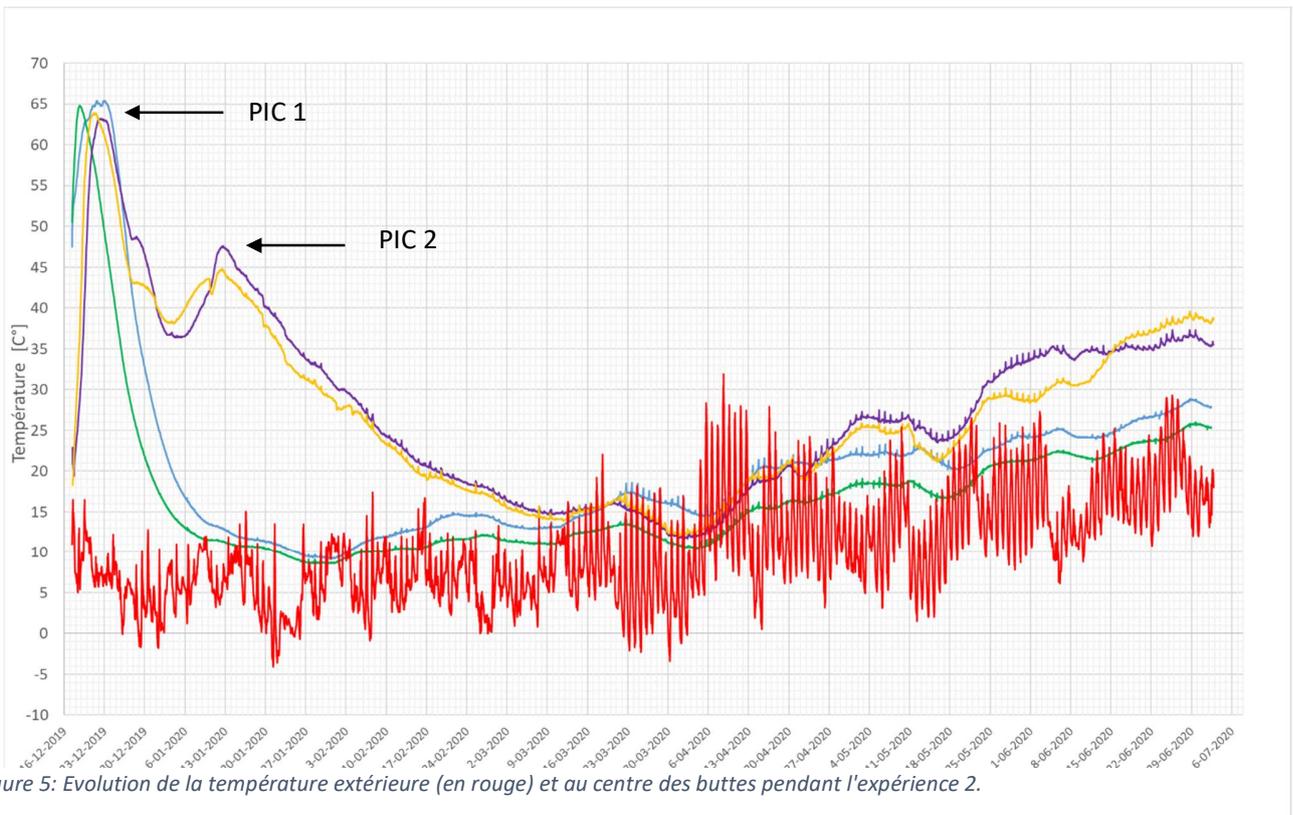
L'évolution de la température extérieure et de la température des tas est présentée à la [Figure 5](#).

Pour l'ensemble des buttes, on remarque une augmentation franche de la température la première semaine, jusqu'à 63-65°C (PIC 1).

La température des buttes témoins redescend ensuite à 12°C (4^{ème} semaine d'expérience). Pour les buttes humusation, la température amorce une chute similaire mais se stabilise autour des 35-37°C avant de remonter jusqu'à 45-47°C (PIC 2).

Finalement, à partir du 15 avril 2020, la hausse des températures extérieures provoque une montée en température lente mais régulière des tas témoins et humusation, jusqu'à 25°C et 35°C respectivement.

A noter également que la différence entre les modalités avec et sans charbon n'est pas très marquée, surtout dans le cas des buttes « humusation ». En moyenne, la température des tas avec charbon est plus élevée de 3,4°C pour les buttes témoin et de 0,7°C dans le cas de l'humusation.



Observations visuelles lors de l'ouverture des tas

Ici encore, l'ouverture des tas a révélé des carcasses non entièrement décomposées et des restes saponifiés après 30 semaines. Par contre, les chairs de la tête, des membres inférieurs et de la partie du tronc située vers le haut avaient presque entièrement été décomposés. En fait, il apparaît que les parties des cadavres situées plus près de la surface des tas ont bénéficié d'un meilleur apport en oxygène que les parties situées au centre et en bas du tas. Une importante odeur de chair pourrie s'est dégagée lors de l'ouverture des tas.

2.3 Discussion

Le rapport C/N du matériau compostable a un impact important sur la montée en température

La correction du rapport C/N dans le 2ème protocole a bien eu un effet sur le compostage. En témoignent les profils des courbes de température, la hausse faible et progressive des températures de l'expérience 1 contrastant avec la hausse rapide des températures de l'expérience 2.

Durant la première semaine de l'expérience, les températures obtenues sont proches des températures que l'on recherche lors d'un compostage, avec ou sans dépouille animale.

Après les premiers jours, la raréfaction de l'oxygène à l'intérieur des tas limite le processus de compostage

La baisse des températures observée après le 1^{er} pic indique un ralentissement important du processus de compostage aérobie. Le rapport C/N ayant été optimisé, il semble que ce phénomène soit lié à un apport insuffisant d'oxygène vers l'intérieur des buttes.

Dès lors, une explication possible du deuxième pic pour les buttes humusation réside dans l'apparition des fissures dans les tas suite au gonflement des corps, comme suggéré dans la première expérience (1.3). Visuellement, on constate d'ailleurs que le sommet des tas « Humusation » présentent tous les deux un tassement de 15 cm environ, là où les tas « Témoin » sont restés bombés ([Figure 6](#)Figure-6).



Figure 6: Photo des buttes de l'expérience 2 en février 2020. De gauche à droite, la butte Humusation + charbon, Humusation, Témoin + charbon et Témoin. On remarque un affaissement au sommet des 2 buttes de gauche.

Il apparaît donc qu'en l'absence d'aération du tas, par exemple par retournement, il est difficile de maintenir des conditions idéales pour le compostage des dépouilles. Le retournement des buttes permet en effet l'homogénéisation et un nouvel apport d'air au centre du tas.

L'hygiénisation du compost obtenu via cette méthode est « faible à moyenne »

Suivant la méthode du couple température-durée illustrée au point 1.3, l'hygiénisation du contenu des tas est « Faible à moyenne » pour les tas humusation avec et sans charbon. D'un point de vue sanitaire, cela semble insuffisant puisque de nombreux pathogènes résistent à ces températures.

Pour les buttes témoins, le couple température-durée ne dépasse pas les valeurs d'hygiénisation les plus basses.

3. Impact sur les sols et qualité du compost

3.1 Résultats

Dans un souci de synthèse, seuls les graphiques présentant des écarts significatifs entre les différentes modalités seront présentés ici.

a) Analyse des sols

Tableau 4: Analyses de reliquats nitrates à trois profondeurs différentes (0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm) pour les 4 modalités de l'expérience 2, plus un Sol Témoin prélevé hors de la zone des buttes.

Profondeur de prélèvement (cm)	Reliquats NO3 (kg/ha)		
	[0-30]	[30-60]	[60-90]
Sol Témoin	4.50	3.32	2.60
Butte témoin	16.24	4.6	3.84
Butte témoin + charbon	13.85	6.16	7.06
Butte humusation	2.72	2.6	3.23
Butte humusation + charbon	9.81	2.93	3.45

Les résultats d'analyse « Reliquats NO3 » montrent une présence de nitrates près de quatre fois plus élevée dans les trente premiers centimètres de sol sous les buttes « Témoin » par rapport au Sol Témoin (Tableau 4). Le sol sous la butte « Humusation » est moitié moins riche en nitrates que le Sol Témoin, alors que les 30 premiers centimètres de sol sous la butte « Humusation + charbon » en contiennent deux fois plus que le Sol Témoin.

En ce qui concerne le reliquat ammoniacque, la tendance est inverse et plus marquée. Alors que la première couche de sol sous les buttes « Témoin » contient la même quantité d'ammoniacque que le Sol Témoin, cette quantité est multipliée par 57 et 40.5 dans le sol sous les buttes « Humusation + charbon » et « Humusation », respectivement (Tableau 5).

Elle est encore entre 5 à 6 fois plus élevée que le Sol Témoin dans la couche 30-60cm sous les buttes « Humusation ». Cela indique une légère tendance à la lixiviation (ou lessivage) vers les eaux souterraines.

Tableau 5: Analyses de reliquat ammoniacque à 3 profondeurs (de 0 à 30cm, de 30 à 60 cm et de 60 à 90 cm) pour les 4 modalités de l'expérience 2, plus un Sol Témoin prélevé hors de la zone des buttes.

Profondeur de prélèvement (cm)	Reliquats NH4 (kg/ha)		
	[0-30]	[30-60]	[60-90]
Sol Témoin	20.2	21.3	14.9
Butte témoin	19.1	18.4	37.2
Butte témoin + charbon	44.5	40.7	41.3
Butte humusation	1151	133.7	61.9
Butte humusation + charbon	818.5	99	86.8

b) Analyse du compost

L'analyse de l'azote total et ammoniacale confirme les observations du point précédent : ces teneurs sont plus élevées dans le compost des buttes « humusation » ([Tableau 6](#)~~Tableau-6~~). On observe également une forte disparité entre les deux échantillons prélevés sur chaque butte, a fortiori dans les buttes humusation.

Tableau 6: Mesures d'azote total (N_{tot}) et d'ammoniacale dans les composts à la fin de l'expérience 2 (2 prélèvements par modalité). Les unités sont des kilogrammes par tonne (poids frais).

		N tot	N-NH4
		kg/T(pf)	kg/T(pf)
Témoin	A	5.69	0.20
	B	5.79	0.14
Témoin + charbon	A	5.93	0.11
	B	6.10	0.17
Humusation	A	6.45	0.29
	B	8.50	1.74
Humusation + Charbon	A	12.00	3.80
	B	8.28	0.64

De façon similaire, on observe une modification du rapport C/N du Broyat utilisé après compostage. Celui-ci passe de 26.81 à 22.5 en moyenne pour les modalités « Témoin » et à 16 pour les buttes « Humusation » ([Tableau 7](#)~~Tableau-7~~).

Tableau 7: Rapport C/N des composts à la fin de l'expérience 2 (2 prélèvements par modalité).

Rapport C/N des composts		
Témoin	A	20.51
	B	23.21
Témoin + charbon	A	22.61
	B	23.28
Humusation	A	15.85
	B	17.45
Humusation + Charbon	A	15.10
	B	15.99

3.2 Discussion

La modification du rapport C/N au cours du compostage peut limiter le processus

En cours d'humusation, les liquides riches en azote libérés par les déjections sont absorbés par le broyat du tas. Il en résulte un excès d'azote localisé et une hétérogénéité de la composition des buttes de compostage, comme relevé à la section précédente. Localement, les conditions ne sont alors plus optimales pour l'humusation et favorisent plutôt la saponification des corps (excès d'azote).

Les teneurs élevées en azote dans le sol sous les buttes sont-elles un danger pour l'environnement ? Parallèle avec les analyses APL (Azote Potentiellement Lessivable)

Pour rappel, les nitrates peuvent être responsables de pollutions environnementales. En cas de fortes pluies, cet ion négatif est peu retenu par les sols et est lessivé jusque dans les cours d'eau (lixiviation). En s'y accumulant, les nitrates causent une prolifération d'algues dont la décomposition par des bactéries prive d'oxygène les autres formes de vie (eutrophisation) (Protect'eau 2020).

Dans le cadre de la « Directive nitrate » européenne, les analyses APL sont menées chaque année entre mi-octobre et mi-décembre sur des parcelles agricoles. Les agriculteurs dont les sols présentent régulièrement des valeurs en APL plus élevées que les courbes types s'exposent à des sanctions. Lors de notre expérience, les valeurs de nitrates dans le sol ont été relevées un jour après l'ouverture des buttes, le 7 juillet 2020. Le risque de lessivage de nitrates à cette époque de l'année est faible car les pluies sont en général peu abondantes et que les végétaux captent les nitrates du sol pour croître.

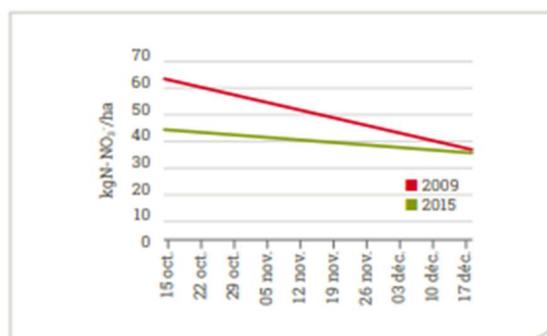
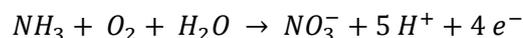


Figure 7: Droites « seuils d'intervention » de référence des analyses APL pour une prairie, mesurée sur l'horizon 0-30 cm (en rouge, la plus haute depuis 2008 et en vert la plus basse) (Protect'eau 2020).

Que ce soit pour les buttes Témoins ou Humusation, les teneurs de nitrates dans le sol sont inférieures aux seuils critiques présentés à la [Figure 7](#). On n'a donc pas de risque de lessivage direct de nitrates. Par contre, si les conditions en automne sont favorables à la nitrification des quantités importantes d'ammoniaque observées (jusqu'à 1151 kg par hectare), les seuils seraient largement dépassés. En effet, la nitrification d'un gramme d'ammoniaque produit environ 3,5 grammes de nitrate par la réaction suivante :



Une piste de solution serait de mener l'humusation dans des cellules en béton comme c'est parfois le cas au Canada (Pigeon, Boutin et Leblanc 2006), avec récupération des liquides de compostage. Mais cette solution mettrait une fois encore à mal l'aspect « naturel » du procédé.

La faible hygiénisation du compost peut représenter un risque sanitaire

En cas de contamination des dépouilles par des souches bactériennes présentant un risque sanitaire, la faible hygiénisation du compost observée dans les conditions de l'expérience n'offrent pas une garantie suffisante en vue de l'utilisation du compost. En cas de percolation ou ruissellement jusqu'aux

cours d'eau souterrains ou de surface, ces bactéries pourraient alors contaminer l'environnement de façon large.

4. Conclusion

Les modes opératoires établis en concertation avec les partenaires de l'étude n'ont pas permis un compostage complet des dépouilles. Plusieurs explications sont avancées, notamment l'accumulation locale de liquides de décomposition des corps et le manque de circulation d'oxygène à l'intérieur des buttes. De plus, le procédé est impacté par les conditions climatiques (pluie et température) et n'est donc pas reproductible en toute saison, ou d'une année à l'autre.

De façon analogue, le suivi des températures via des sondes placées au centre des tas et dans les dépouilles montre une hygiénisation moyenne du contenu dans le meilleur des cas (couple température-durée). Ces conditions ne permettent pas l'élimination de tous les pathogènes, et le contenu des buttes d'humusation présente donc un risque sanitaire résiduel.

Une autre problématique étudiée est celle de la pollution de l'environnement. Les quantités importantes d'ammoniaque mesurées dans les sols sous les buttes d'humusation risquent, en se convertissant en nitrates à l'arrière-saison, d'être lixiviées vers les cours d'eau. Un parallèle avec les analyses APL (Azote Potentiellement Lessivable) nous a permis d'évaluer qualitativement ce risque. En ce qui concerne les éléments autres que l'azote, les mesures effectuées n'ont pas mis en évidence d'autres polluants potentiels.

Ces résultats montrent que l'humusation naturelle telle qu'étudiée ici n'apporte pas une réponse satisfaisante aux enjeux présentés dans la préface. Certaines améliorations pourraient être envisagées (ventilation passive, collecte des liquides de décomposition, travail sur les caractéristiques d'absorption des matériaux...) mais celles-ci impliquent des changements significatifs en termes d'image, de complexité de mise en place...par rapport à l'humusation naturelle telle que mise en avant par les associations environnementales et singulièrement en Wallonie la Fondation Métamorphose.

Finalement, pour parvenir à un procédé reproductible et répondant aux questions posées par l'inhumation et la crémation, les aspects techniques ne sont pas les seuls à devoir être pris en compte. Cela nécessiterait une réflexion multidisciplinaire s'intéressant aussi bien aux aspects juridiques, médicaux, biologiques, qu'à l'impact sur les conditions de travail du personnel et au respect des pratiques funéraires.

Bibliographie

- ADEME - Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. 2001. *Les boues de station d'épuration et leur utilisation en agriculture*. ADEME.
- Bonhotal, Jean, Mary Schwarz, et Robert Rynk. 2014. «Composting Animal Mortalities.» Cornell Waste Management Institute, 1-23.
- CNIEL - Centre national interprofessionnel de l'économie laitière. 2010. *L'épandage des boues d'épuration sur prairies en élevage laitier : guide pratique*. Institut de l'Élevage. ADEME.
- Desrochers, Serge. 2014. «D'autres alternatives pour disposer des cadavres à la ferme.» Édité par Centre d'Insémination Porcine du Québec Inc. *Le Courrier* 18 (4): 5-6.
- Devault-Weaver, Will. 2020. «The Architecture of Human Composting.» Thesis, University of Washington.
- FAO. 2005. «Méthode de compostage au niveau de l'exploitation agricole.» Document de travail sur les terres et les eaux n°2, 48.
- Feix, I., et J. Wiart. 1998. *Connaissance et maîtrise des aspects sanitaires de l'épandage des boues d'épuration des collectivités locales*. ADEME.
- Fondation "Métamorphose". 2017. *Plaidoyer pour l'humusation: une nouvelle pratique funéraire en harmonie avec les processus du vivant*. Ed. Fondation Métamorphose.
- Guttman, Sable, Jade Watson, et Valerie Miller. 2011. «'Til Death Do We Pollute, and Beyond: The Potential Pollution of Cemeteries and Crematoriums.» 22 March. <https://archive.org/details/tilDeathDoWePolluteAndBeyondThePotentialPollutionOfCemeteriesAnd>.
- Hawkins, B. 2019. «Ontario - Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales - Compostage de cadavres de bovins à la ferme.» *omafra.gov.on.ca*. Janvier. Accès le Spetember 02, 2020. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/10-064.htm#7>.
- Jonker, Cornelia, et Jana Olivier. 2012. «Mineral Contamination from Cemetery Soils: Case Study of Zandfontein Cemetery, South Africa.» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7 February: 511-520. doi:10.3390/ijerph9020511.
- Kiley, Brendan. 2019. «Recompose, the human-composting alternative to burial and cremation, finds a home in Seattle's Sodo area.» *The Seattle Times*.
- Leblanc, Raymond, et Sylvain Pigeon. 2009. «Méthodes de gestion des animaux porcins morts.» <http://www.accesporcqc.ca/>. Juin. http://www.accesporcqc.ca/nsphp/portail/publications/pub_dl.php?dir=470&download=methodedegestiondesanimauxmortsjuin2009.pdf.
- Pigeon, Sylvain, Réal Boutin, et Raymond Leblanc. 2006. «Compostage à la ferme des animaux porcins morts: Guide technique.» November. https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/guide_compostage_porcs.pdf.

- Protect'eau. 2020. *Le Programme de Gestion Durable de l'Azote: Le nitrate*. Accès le September 4, 2020. <https://protecteau.be/fr/nitrate/grand-public/le-pgda/le-nitrate>.
- . 2020. «Protect'eau: Fiches techniques N et phyto et autres outils.» Accès le septembre 4, 2020. [https://protecteau.be/resources/shared/publications/fiches-techniques/190109_PE_7.2_APL\(1809\)_Graphes_new.pdf](https://protecteau.be/resources/shared/publications/fiches-techniques/190109_PE_7.2_APL(1809)_Graphes_new.pdf).
- Ross, R. 2016. *Inside the machine that will turn your corpse into compost*. Accès le March 10, 2019. <https://www.wired.com/2016/10/inside-machine-will-turn-corpse-compost>.
- Schotsmans, Eline M.J., Nicholas Márquez-Grant, et Shari L. Forbes. 2017. *Taphonomy of Human Remains: forensic analysis of the dead and the depositional environment*. John Wiley & Sons Ltd.
- Vaezihir, Abdorreza, et Simozar Mohammadi. 2016. «Groundwater contamination sourced from the main cemetery of Tabriz, Iran.» *Environmental Forensics*, 09 May: 172-182. doi:10.1080/15275922.2016.1163621.
- Wilson, Andrew S., Robert C. Janaway, Andrew D. Holland, Hilary I. Dodson, Eve Baran, Mark A. Pollard, et Desmond J. Tobin. 2007. «Modelling the buried human body environment in upland climes.» *Forensic Science International*, 14 September: 6-18.