

Prévention du risque de dissémination des plantes invasives via la filière de valorisation des déchets verts par compostage

-

Etude de la survie des tiges, des rhizomes et des graines de renouées asiatiques intégrés dans un compost industriel

Rapport d'expérimentation

Département de la Savoie
Direction de l'Environnement et du Paysage
1 rue des Cévennes
730008 Chambéry cedex

Janvier 2018
Réf. 89 - Vf



LE DÉPARTEMENT



* identité administrative provisoire, issue de la
fusion de CHAMBERY METROPOLE ET la
communauté de communes CŒUR DES BAUGES



Intitulé de l'étude	Etude de la survie des tiges, des rhizomes et des graines de renouées asiatiques intégrés dans un compost industriel
Bureau d'étude	Concept.Cours.d'EAU.SCOP Alpespace - 427 voie Thomas Edison 73800 Ste Hélène-du-Lac contact@cceau.fr Tél : 04-79-33-64-55
Maître d'ouvrage	Département de la Savoie
Etude suivie par	Claire RAMEAUX
Date de démarrage de l'expérimentation	14 décembre 2016
Rendus	• rapport d'expérimentation
Durée totale de l'étude	12 mois

Expérimentation réalisée avec le concours de Claire RAMEAUX et Jean-Pierre ARGOUD du département de la Savoie, Jonathan CLAVEAU et Sandrine CHABOUD de SUEZ Organique et Vincent GUENIN de la communauté d'agglomération de Chambéry.

Pour citer ce document, merci d'utiliser la référence suivante :

Barthod L. and Boyer M. 2017. Prévention du risque de dissémination des plantes invasives via la filière de valorisation des déchets verts par compostage - Etude de la survie des tiges, des rhizomes et des graines de renouées asiatiques intégrés dans un compost industriel, Concept.Cours.d'EAU : 52 p.

Sommaire

1. Résumé	1
2. Introduction	3
2.1. Contexte.....	3
2.2. Synthèse bibliographique.....	5
2.2.1. Effet du compostage sur les tiges et les rhizomes.....	5
2.2.2. Effet du compostage sur les graines	6
2.3. Objectifs de l'expérimentation	7
3. Matériels et méthodes	8
3.1. Description du procédé industriel	8
3.2. Fourniture de graines, rhizomes et tiges de renouées asiatiques.....	10
3.2.1. Récolte des graines	10
3.2.2. Prélèvement de rhizomes	11
3.2.3. Récolte des tiges	12
3.3. Risques de dissémination	12
3.4. Intégration dans le procédé industriel	13
3.4.1. Essai de compostage des rhizomes et des graines	13
3.4.2. Essai de compostage des tiges.....	17
3.5. Suivi.....	19
3.5.1. Température dans le compost.....	19
3.5.2. Evolution des diaspores durant le processus.....	19
3.5.3. Tests de germination	20
3.5.4. Evolution du compost après traitement.....	20
4. Résultats	24
4.1. Montée en température.....	24
4.1.1. Compost avec des graines et des rhizomes	24
4.1.2. Compost avec des tiges	25
4.2. Effet sur les rhizomes	26
4.2.1. Suivi des rhizomes en cours de compostage	26
4.2.2. Suivi des rhizomes sur le compost épandu.....	29
4.3. Effet sur les graines.....	32
4.3.1. Vérification de la capacité de germination des graines.....	32
4.3.2. Tests de germination sur les sachets de graines introduits dans le compost.....	33
4.3.3. Suivi des semis sur le compost	35
4.4. Effet sur les tiges.....	36

5. Discussion	39
5.1. Conditions de l'essai	39
5.2. Dévitalisation des rhizomes	40
5.3. Dévitalisation des graines	41
5.4. Dévitalisation des tiges	42
5.5. Risques de dissémination via les engins	43
5.6. Transposition à d'autres sites de compostage	46
5.6.1. Evaluation du risque de survie des diaspores	46
5.6.2. Evaluation du risque de dispersion par les engins	47
6. Conclusions et perspectives	50
7. Références bibliographiques	51

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : fauche des renouées asiatiques	3
Figure 2 : broyage grossier des déchets verts (Noremat Valormax A72150RS)	9
Figure 3 : mise en andains des matériaux	9
Figure 4 : drains (ventilation forcée)	9
Figure 5 : retournement mécanique	9
Figure 6 : criblage final	9
Figure 7 : récolte de graines – hiver 2015 et automne 2016	10
Figure 8 : extraction des rhizomes à la pelleuse	11
Figure 9 : tri manuel	11
Figure 10 : transport	11
Figure 11 : 10 m ³ soit 73 km de rhizomes et 170 000 fragments	11
Figure 12 : 7 m ³ de tiges, soit 8000 tiges	12
Figure 13 : mélange de rhizomes et de compost frais	14
Figure 14 : ensemencement des graines	14
Figure 15 : homogénéisation des matériaux à la chargeuse	14
Figure 16 : mise en andains du stock infesté	14
Figure 17 : stock de compost infesté par les rhizomes et les graines	14
Figure 18 : intégration du lot infesté dans la chaîne de production	14
Figure 19 : retournement du lot infesté par les rhizomes et les graines – juin 2017	15
Figure 20 : sachet en toile nylon contenant 100 graines	16
Figure 21 : mélange des tiges et du compost frais	17
Figure 22 : homogénéisation	17
Figure 23 : intégration du stock infesté par des tiges dans la chaîne de production	17
Figure 24 : retournement du stock infesté par des tiges (septembre 2017)	18
Figure 25 : contrôle de la température	19
Figure 26 : tests de germination – juin 2017	20
Figure 27 : épandage du compost	21
Figure 28 : tassement	21
Figure 29 : préparation des zones témoins	21
Figure 30 : enfouissement des rhizomes témoins	21
Figure 31 : ensemencement des placettes témoins	22
Figure 32 : zone d'épandage	22
Figure 33 : vue aérienne du site avant épandage	22
Figure 34 : inspection approfondie du compost pour repérer d'éventuels semis	23
Figure 35 : fouilles du compost (18) pour détecter d'éventuelles boutures	23
Figure 36 : suivi de température – stock de rhizomes et de graines	24
Figure 37 : suivi de température – stock de tiges	25
Figure 38 : bouturage d'un rhizome après trois semaines de compostage	26

Figure 39 : développement de tiges et de feuilles en surface du tas après deux mois de compostage	26
Figure 40 : pousses de renouées du Japon sur le tas de compost après trois mois de compostage (mars 2017)	26
Figure 41 : Comparaison de l'état des rhizomes entre l'intérieur du tas et sa surface après trois mois de compostage – les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95%	27
Figure 42 : pousses de renouées du Japon après cinq mois de compostage et un retournement mécanique (mai 2017)	28
Figure 43 : bouture d'un très petit fragment de rhizome après cinq mois passé en surface du tas de compost	28
Figure 44 : rhizomes morts en surface du tas de compost après 8 mois de compostage (juillet 2017).....	29
Figure 45 : données climatiques à la station du Viviers du Lac pour les mois de septembre et octobre 2017 .	30
Figure 46 : effet du compostage sur le nombre de repousses.....	31
Figure 47 : pousses issues de rhizomes vifs sur les zones témoins (10/10/2017)	31
Figure 48 : rhizomes morts après compostage	31
Figure 49 : bouturage de rhizomes sur les zones témoins et absence de bouturage en dehors (15/10/2017)	32
Figure 50 : graines ayant passé huit mois et demi dans le compost (gauche) – graines témoins (droite) – 28 jours de mise en culture	34
Figure 51 : Influence du compostage sur le taux de germination des graines (A : 36 semaines de compostage, B : 22 semaines de compostage, C : 10 semaines de compostage, T : graines témoins) – les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95%	34
Figure 52 : effet du compostage sur le nombre de semis.....	35
Figure 53 : semis de renouée et bâtonnet de repérage du semis - la fourmi donne l'échelle	36
Figure 54 : suivi des précipitations à Chambéry de juin à octobre 2017 (source Météo France).....	36
Figure 55 : formation d'une jeune feuille de renouée sur une tige en surface du tas de compost (12/07/2017)	37
Figure 56 : repousses sur le stock de tiges	37
Figure 57 : repousses issues d'une même tige	37
Figure 58 : repousses sèches (11 août 2017).....	38
Figure 59 : tiges sèches, premier retournement	38
Figure 60 : vue aérienne du site (juillet 2017 – Google Earth®).....	43
Figure 61 : godet exempt de débris végétaux, une fois déchargé	44
Figure 62 : risque de dispersion des diaspores via le broyeur à végétaux.....	45
Figure 63 : évaluation du risque de survie de la plante en fonction des conditions de compostage	47
Figure 64 : Arbre décisionnel pour l'évaluation des risques de dissémination des renouées asiatiques via la filière de compostage.....	48
 Tableau 1 : déroulement des opérations – compost de graines et de rhizomes	15
Tableau 2 : déroulement des opérations : compostage des graines en sachets	16
Tableau 3 : déroulement de l'essai de compostage des tiges	18
Tableau 4 : comptage des semis après mise en culture de graines suite à la récolte d'octobre 2016	32
Tableau 5 : évaluation du taux de germination moyen pour les graines témoins	33
Tableau 6 : statistiques obtenues lors des tests de germinations	34

1. RESUME

Beaucoup de déchetteries refusent les déchets verts issus des fauches ou des arrachages de renouées pour éviter tout risque de dissémination de la plante. Elles le font par mesure de précautions connaissant les impacts importants de cette plante, mais il existe peu de données sur ce risque via la filière de valorisation des déchets verts par compostage. C'est le cas à Chambéry et cela pose des problèmes pour les communes et le département, qui ne savent que faire de ces produits. Pour évaluer ce risque au niveau local, une expérimentation a été menée. Elle a consisté à intégrer les différentes parties de la plante (rhizomes, graines, et tiges) dans un compost industriel et à étudier leur survie sur un cycle complet de compostage, soit huit mois de traitement. Les renouées ont été introduites de manière massive en début de processus pour suivre des volumes importants de compost expérimental intégrant l'hétérogénéité des produits en cours de compostage. La plateforme testée est celle de Chambéry Métropole – Cœur des Bauges, qui appartient à l'agglomération. Elle est gérée par SUEZ. L'étude a été financée par le département et confiée à Concept.Cours.d'EAU.

Les résultats montrent que le procédé, tel qu'il est mis en œuvre sur cette plateforme de compostage, conduit à dévitaliser les tiges, les graines et les rhizomes des renouées asiatiques et qu'il n'y a aucun risque de disséminer la plante via la diffusion du produit final.

Par ailleurs, comme pour tout chantier manipulant des plantes invasives, il existe des risques spécifiques via le déplacement des engins ou des outils réalisant certaines opérations sur le site. Au regard de l'organisation sur la plateforme et des procédures déjà mises en place, ce risque est nul si les mesures suivantes restent toujours respectées :

- l'usage du broyeur sur d'autres sites est réservé exclusivement à des opérations ne présentant pas de risque de dissémination de la plante (production de compost ou de bois énergie comme aujourd'hui) ;
- dans l'hypothèse où le broyeur serait aussi utilisé pour du broyage en milieu naturel ou pour la production de paillis destiné aux espaces verts, une étude spécifique devrait être réalisée pour confirmer l'absence de risque de dissémination ;
- terminer l'opération de broyage des végétaux entrants avec des stocks exempts de renouées asiatiques ;
- nettoyer le broyeur avant qu'il ne quitte le site avec des précautions spécifiques pour éviter que cette opération ne soit une source de dispersion des diaspores sur la plateforme ;
- vérifier que les façons de manipuler les stocks et l'agencement de ceux-ci sur la plateforme empêchent tout risque de mélanger des produits à différents stades de traitement (ce qui est le cas aujourd'hui).

Cet essai a permis de faire de nouvelles hypothèses ou constats sur les mécanismes de dévitalisation des diaspores au cours du compostage. Elle a notamment mis en évidence une forte hétérogénéité des conditions auxquelles sont soumises les propagules et les graines au sein d'un andain. A l'intérieur du tas, les propagules sont dévitalisées en quelques mois par dessiccation, alors qu'elles peuvent survivre pendant plusieurs mois en surface. De même, les graines conservent leur potentiel de germination après au moins

cinq mois passés en surface du tas. Ainsi, les retournements destinés à aérer le compost provoquent aussi une homogénéisation du produit, qui s'avère indispensable à la dévitalisation complète des diaspores.

Les résultats montrent également que le seul respect des conditions minimales imposées par l'arrêté du 22 avril 2008 fixant les règles que doivent suivre les installations de compostage soumises à autorisation¹, ne garantit absolument pas l'absence de risque de dissémination des renouées asiatiques. Il a en effet été constaté des repousses malgré une première homogénéisation du compost et des températures nettement supérieures à 55°C pendant trois jours consécutifs.

Cet essai permet également de fixer des préconisations plus générales pour d'autres installations. Ainsi, les plateformes de compostage peuvent accepter les résidus issus de la gestion des renouées asiatiques sans risque de dissémination de ces plantes, si toutes les conditions suivantes sont remplies :

- huit mois de traitement ;
- deux retournements mécaniques ;
- des montées en température conséquentes et constantes à l'intérieur de l'andain : de l'ordre de 70°C pendant le premier mois de traitement, puis supérieures à 55°C après chaque retournement pendant plusieurs jours consécutifs ;
- une évaluation des risques de dispersion des diaspores par les engins ou les outils et la mise en place de mesures préventives appropriées.

Par contre, pour des plateformes de compostage industriel fonctionnant avec des durées beaucoup plus courtes de compostage ou des températures moins élevées, le risque de dissémination peut exister et le doute ne pourra être levé que par des études complémentaires spécifiques prenant en compte l'hétérogénéité des conditions de compostage.

Enfin, il est possible d'affirmer que les procédés de compostage en andains avec un seul retournement présentent des risques de survie des diaspores de renouées asiatiques, compte-tenu de l'homogénéisation insuffisante du produit.

¹ deux semaines de ventilation forcée au cours desquelles la température doit dépasser 55°C pendant trois jours consécutifs et un retournement à l'issue duquel la température doit être supérieure à 50°C pendant 24 h

2. INTRODUCTION

2.1. Contexte

Les renouées asiatiques (*Fallopia sp.*) sont des plantes invasives qui produisent une grande quantité de biomasse. Au printemps, leurs tiges peuvent croître jusqu'à 10 cm par jour pour atteindre 3 à 4 m de hauteur (GT IBMA 2016). Il est donc parfois nécessaire de les faucher plusieurs fois par an (trois à cinq fois en moyenne), ce qui entraîne des volumes considérables de déchets végétaux. La plante peut aussi être gérée par arrachage manuel.



Figure 1 : fauche des renouées asiatiques

Selon la réglementation en vigueur, les résidus issus de la gestion de ces plantes sont assimilables à des déchets organiques et plus précisément à des déchets verts ou des biodéchets (article R 541-8 et R 543-225 du Code de l'Environnement). En ce sens, ils peuvent entrer dans les filières prévues par les textes réglementaires, à savoir le compostage, la méthanisation, l'épandage sur sols agricoles ou encore l'incinération (Sarat et al. 2015). Cette dernière solution est néanmoins déconseillée car les végétaux peuvent perturber le fonctionnement des usines d'incinération en raison de leur taux d'humidité élevé. De plus, cette filière est coûteuse (70 à 120 €/T²) et peu écologique. Il est donc plus judicieux de privilégier les filières permettant de valoriser les déchets verts (30 à 70 €/T) sous forme de compost ou de digestat susceptibles d'être utilisés en agriculture et horticulture.

Les déchets verts issus de la gestion des renouées asiatiques sont essentiellement constitués des parties aériennes de la plante (tiges et feuilles). Néanmoins, ils peuvent aussi contenir des fragments de rhizomes situés à la base des tiges, qui se détachent du reste de la partie souterraine au cours d'un arrachage manuel ou d'une fauche mécanique. Une étude de suivi en milieu naturel de tiges de renouées asiatiques coupées à ras du sol a en effet montré que des repousses pouvaient être observées à partir de cette partie rhizomateuse à la base des tiges (Gerber 2013). Par ailleurs, des fauches réalisées tardivement (août, septembre) peuvent conduire à la présence de graines dans les résidus. Les produits végétaux issus de la gestion des renouées asiatiques peuvent ainsi contenir les trois types de diaspores : des tiges, des rhizomes et des graines.

² Source ADEME 2013

La prise en compte des impacts des plantes invasives a conduit à s'interroger sérieusement sur les risques de dissémination via les filières de compostage avec en première ligne les renouées asiatiques, dont les capacités exceptionnelles de reproduction par voie végétative sont maintenant bien connues. Mais la viabilité de la plante au cours du processus de compostage ayant été peu étudiée, de nombreuses déchetteries et plateformes de compostage ont préféré refuser systématiquement ce type de déchets verts. C'est le cas notamment dans la région de Chambéry. Cela pose des problèmes importants pour tous les chantiers d'entretien des espaces envahis par les renouées, quand la biomasse ne peut être laissée sur place mais doit être exportée.

Néanmoins, les quelques retours d'expériences disponibles (cf. paragraphe 2.2) indiqueraient que les produits végétaux issus de la fauche ou de l'arrachage des renouées peuvent être complètement dévitalisés par le processus de compostage.

Dans ce contexte et afin d'analyser le risque réel sur la région de Chambéry, le département de la SAVOIE a décidé de lancer une expérimentation en grandeur réelle sur la plateforme de compostage de Chambéry-le-Vieux. Celle-ci est gérée par SUEZ pour le compte de la communauté d'agglomération de Chambéry.

Le projet expérimental a été mis au point et suivi par Concept.Cours.d'EAU, bureau d'études spécialisé dans l'étude des plantes invasives.

Le département a récolté et transporté vers la plateforme les rhizomes et les tiges de renouées. Concept.Cours.d'EAU a récolté les graines. SUEZ a intégré ces différents produits végétaux dans son compost et réalisé le suivi de températures. Puis le Département a récupéré et épandu le compost produit.

2.2. Synthèse bibliographique

2.2.1. Effet du compostage sur les tiges et les rhizomes

Les risques de dissémination des plantes invasives via les filières de compostage dépendent à la fois du procédé employé mais aussi de la biologie des espèces. Les renouées du Japon disposent de capacités exceptionnelles de multiplication par voie végétative. Les rhizomes en sont l'organe essentiel de reproduction. En effet, un très petit fragment de rhizome portant un seul nœud peut régénérer très rapidement la plante entière. Les tiges aériennes sont aussi capables de bouturer pendant la saison végétative. Il suffirait donc qu'un fragment de tige ou de rhizome pouvant se multiplier survive au compostage pour que ce procédé soit source de dissémination (HAURY 2005). Or, les données disponibles concernant la survie des propagules sont souvent contradictoires et encore très incomplètes. Par exemple, une enquête menée en 2011 à Vancouver (Rempel 2011) mentionne que de nombreuses personnes ont constaté des repousses de renouées asiatiques lors de l'utilisation de composts sans toutefois pouvoir affirmer que le compost est bien à l'origine de la dispersion de propagules.

Au contraire, des premiers essais réalisés en 2008 par le CPIE des Monts du Pilat (Dufrost 2008) étaient plutôt encourageants puisqu'aucune repousse n'a été constatée après avoir introduit des tiges de renouées asiatiques dans un compost industriel pendant trois et sept semaines. Mais, ces observations ont été réalisées sur de petits volumes (échantillons de 3 L) et n'ont pas tenu compte de l'hétérogénéité des processus mis en jeu (échantillonnage non représentatif). Par la suite, la FRAPNA en collaboration avec la ferme du Chosal (Lebert 2010, Gilles 2012) ont conclu en l'absence de régénération végétative (tiges et rhizomes) après sept mois de compostage. Cette expérience a néanmoins été réalisée sur des petits volumes, retournés toutes les trois semaines et elle n'est donc pas représentative de la réalité industrielle.

Des essais en laboratoire à partir de très petits fragments de rhizomes ont aussi été menés (Xian et al. 2011) et ont montré que ceux-ci pouvaient être inactivés après 48h à 45°C ou 72h à 40°C. Précisons que la taille des échantillons dans cette expérience (uniquement 3 rhizomes par modalité de traitement) est très faible et que ces résultats ne sont probablement pas significatifs. De même, une expérience d'enfouissement de fragments de rhizomes dans un compost industriel, traitant des déchets ménagers et des boues de stations d'épuration, (Day et al. 2009) a également mis en évidence la dévitalisation de petits fragments de rhizomes après trois jours à 52-55°C.

En 2015, un essai de compostage de tiges de renouées asiatiques avant montée en graines a été effectué sur une plateforme de compostage d'AGRIVALOR (Lerch 2015). Le compost obtenu a ensuite été épandu sur des parcelles agricoles. Après deux mois de saison végétative, aucune repousse de renouées asiatiques n'avait été observée.

Ainsi, ces retours d'expériences laissent supposer que les tiges et les rhizomes ne survivent pas au compostage. Néanmoins, ces essais ont été entrepris sur de petits volumes et/ou sur des petits fragments de rhizomes. Ils ne tiennent donc pas compte de l'hétérogénéité du tas (présence éventuelle de points froids dus au procédé) ou de celle des rhizomes qui peuvent être plus ou moins gros, longs et lignifiés.

2.2.2. Effet du compostage sur les graines

Les renouées asiatiques peuvent aussi se reproduire par voie sexuée. C'est notamment ce qui explique une certaine diversité génétique chez les hybrides *R. x bohemica* (Bailey et Wisskirchen 2006). Bien que les graines aient un rôle relativement faible dans la dissémination de la plante en milieu naturel par rapport à celui des rhizomes et des tiges, leur devenir au cours du processus de compostage doit être évalué. En effet, une étude a montré (Forman et Kesseli 2003) que les semis se développant dans les massifs de renouées avaient une forte probabilité de dépérir du fait de l'ombrage qu'apporte la plante mais qu'ils peuvent survivre, au moins jusqu'à la saison suivante, dans des milieux ouverts.

A notre connaissance, très peu de données sont disponibles concernant l'effet du compostage sur les graines de renouées du Japon. Les recherches se sont concentrées sur les plantes nuisibles pour l'agriculture en s'interrogeant sur l'effet de la chaleur générée par le compostage sur la viabilité des graines. Plusieurs études (Grundy et al. 1998, Tompkins et al. 1998, Eghball et Lesoing 2000, Larney et Blackshaw 2003) ont mis en évidence la non-viabilité de la plupart des graines testées pour des températures de l'ordre de 55 à 65°C durant des périodes très variables comprises entre deux et dix-huit semaines. Les graines viables au-delà de ces délais correspondaient à des points restés froids dans les andains (erreur de manipulation lors des retournements). Cependant, une étude plus récente (Daugovish et al. 2007, Lavoie 2017) a montré que des températures plus élevées, de l'ordre de 85°C, étaient parfois nécessaires pour dévitaliser des graines d'adventices.

Dans un rapport (Vial 2014), le CEN Centre évoque un essai (date inconnu) réalisé par le CPIE du Pays Creusoix indiquant qu'une température de 60°C pendant quatre jours permettrait d'annihiler le pouvoir germinatif des graines de renouées. Cependant, aucune information n'est disponible sur les conditions de cette expérimentation.

L'état actuel des connaissances ne permet donc pas de conclure en l'absence de risques de dissémination des renouées asiatiques via le processus de compostage. Des expérimentations doivent être menées afin d'étudier la viabilité des tiges, des rhizomes et des graines de cette plante dans le but de savoir si celle-ci peut être acceptée sans risque par les plateformes de compostage des déchets verts.

2.3. Objectifs de l'expérimentation

Les résidus issus de la gestion des renouées asiatiques pouvant être constitués de tiges, de rhizomes et de graines, l'expérimentation a consisté à intégrer ces diaspores dans un compost industriel, puis à étudier leur survie tout au long du processus.

Cette expérimentation en grandeur réelle avait pour objectifs de :

- évaluer les risques de dissémination de la plante via le compost produit par la plateforme de compostage de Chambéry le Vieux ;
- proposer des mesures spécifiques pour limiter ce risque le cas échéant ;
- de manière plus générale, contribuer à la désignation d'exutoire approprié pour les résidus de gestion des renouées asiatiques.

Pour répondre à ces problématiques et conclure sur la survie de chacune des diaspores indépendamment les unes des autres, l'expérimentation a été réalisée sur des quantités très importantes de tiges, graines et rhizomes (voir paragraphes 3.2 et 3.4). Cela a permis de prendre en compte l'hétérogénéité du compost et de maximiser à l'extrême les possibilités de régénération de la plante.

Ainsi dans l'essai, les proportions diaspores/compost sont nettement supérieures à celles qui seraient obtenues en conditions normales. En outre, la qualité du compost obtenu n'est pas représentative de ce qu'elle pourrait être hors contexte expérimental, mais ce n'était pas le but recherché.

Par ailleurs, l'essai n'avait pas pour objectif de trouver une filière d'élimination des rhizomes, mais d'étudier le risque lié à leur présence dans les produits de fauche ou d'arrachage des renouées. La nature ligneuse des rhizomes fait en effet qu'ils ne seraient pas acceptés dans le compost en quantité aussi massive que dans l'expérimentation. De plus, il est rare que des chantiers produisent comme déchets des rhizomes seuls. Actuellement, ce type de déchets est le plus souvent généré par les terrassements de terres envahies et dans ce cas les rhizomes sont étroitement mélangés à des terres.

3. MATERIELS ET METHODES

3.1. Description du procédé industriel

L'expérimentation a eu lieu sur la plateforme de compostage de Chambéry-Le-Vieux (73). L'exploitation, gérée par SUEZ pour le compte de la communauté d'agglomération de Chambéry, traite en moyenne 15 000 tonnes de déchets verts par an. Ces déchets proviennent des parcs et jardins uniquement. Ils sont apportés par l'intermédiaire de quatre déchetteries de la communauté d'agglomération, des communes et services techniques publics, ainsi que directement par les professionnels (paysagistes, élagueurs etc.) et quelques particuliers.

Lors de la réception des déchets verts, les matériaux exogènes sont retirés manuellement, puis les végétaux sont broyés grossièrement. Le broyage est réalisé par un prestataire spécialisé dans le broyage de déchets verts et de bois énergie. Il intervient sur le site toutes les deux semaines environ pour une durée de trois à quatre jours.

Les matériaux broyés sont ensuite mis en andains sur une zone du site équipée de 27 drains dans lesquels de l'air est insufflé afin d'oxygéner l'ensemble du tas de bas en haut. La hauteur des andains atteint 5 m grâce à un arrêté dérogatoire. La ventilation forcée, appliquée pendant les six premières semaines de compostage, permet de créer les conditions nécessaires à la dégradation de la matière organique par des micro-organismes aérobies. Cette phase se traduit par une élévation considérable de la température, qui atteint une valeur moyenne de l'ordre de 70 à 75°C, et a pour effet de détruire les pathogènes. Selon l'arrêté du 22 avril 2008 fixant les règles que doivent suivre les installations de compostage soumises à autorisation, cette phase de fermentation aérobie doit durer au minimum deux semaines et permettre d'atteindre au moins 55°C pendant trois jours consécutifs.

Ensuite, le tas de compost est avancé par tranche tous les deux à trois mois environ. Ces déplacements à la chargeuse, contribuent aussi à oxygéner le compost et permettent d'homogénéiser les matériaux. Trois phases de retournement sont réalisées au minimum. Selon l'arrêté du 22 avril 2008, le nombre minimal de retournement à effectuer est fixé à 1, il doit être réalisé de manière à atteindre une température minimale d'au moins 50°C pendant 24 h.

Au total, le processus dure environ huit à douze mois. En fin de cycle, les matériaux sont criblés à l'aide d'un trommel. Trois types de granulométrie sont obtenus (0-12 mm ; 0-20 mm et 0-50 mm). Les refus de criblage sont réintroduits en début de processus ou valorisés en chaufferie.

le processus de compostage en images

broyage grossier et mise en andains des déchets verts



Figure 2 : broyage grossier des déchets verts
(Noremat Valormax A72150RS)



Figure 3 : mise en andains des matériaux

ventilation forcée : durée six semaines



Figure 4 : drains (ventilation forcée)

retournement tous les deux à trois mois



Figure 5 : retournement mécanique

après huit à douze mois, criblage



Figure 6 : criblage final

3.2. Fourniture de graines, rhizomes et tiges de renouées asiatiques

3.2.1. Récolte des graines

Des graines de renouées asiatiques ont été récoltées sur un banc de l'Isère, sur lequel le développement de semis avait été observé par le passé. Sur ce site, au moins deux clones différents ont été identifiés :

- un clone mâle stérile (ou femelle) ;
- et un clone hermaphrodite (ou mâle fertile), à un stade beaucoup plus avancé de colonisation.

Une hybridation entre ces deux clones est possible et des semis ont été observés à l'état naturel.

Deux récoltes de graines ont été réalisées, une première durant l'hiver 2015 puis une seconde en octobre 2016. Les graines ont été stockées dans un endroit sec, à l'abri de la lumière à une température moyenne d'environ 14°C pendant un an pour les graines récoltées en hiver 2015 et pendant deux mois pour celles récoltées en octobre 2016.

Les graines issues des deux récoltes ont ensuite été mélangées et une partie d'entre elles ont été intégrées dans le compost (voir paragraphe 3.4.1). L'autre partie a été conservée dans un endroit sec, à l'abri de la lumière, à une température moyenne d'environ 14°C, pour servir de témoins lors des essais de germination.



Figure 7 : récolte de graines – hiver 2015 et automne 2016

3.2.2. Prélèvement de rhizomes

Des rhizomes de renouées du Japon ont été prélevés sur un site à proximité du Gelon sur la commune de Villard Léger (73) les 14 et 15 décembre 2016.

Les rhizomes ont tout d'abord été extraits à l'aide d'une pelleteuse équipée d'un godet de terrassement, puis triés manuellement pour enlever la terre et tous éléments minéraux, non acceptés par les plateformes de compostage.

Au total, 2,04 T, soit un volume d'environ 10 m³ de rhizomes ont été récoltés. Lors de cette opération, la longueur moyenne des rhizomes a été estimée à 43 cm (N=88, écart-type=17 cm). Le nombre total de rhizomes récoltés a été évalué à 170 000, soit une longueur totale de rhizomes de 73 km.



Figure 8 : extraction des rhizomes à la pelleteuse



Figure 9 : tri manuel



Figure 10 : transport



Figure 11 : 10 m³ soit 73 km de rhizomes
et 170 000 fragments

3.2.3. Récolte des tiges

Des tiges de renouées du Japon ont été récoltées le 28 juin 2017 au Viviers-du-Lac (73). Elles ont été coupées à la débroussailleuse à étoiles sans être fragmentées et sans prendre de rhizomes puis chargées dans un camion à l'aide d'un engin.

Au total, 640 kg de tiges ont été récoltées, soit un volume d'environ 7 m³ après tassement. En se basant sur les calculs de biomasse effectués par *Gerber et al.* (2010), le nombre total de tiges a été estimé à environ 8000.



Figure 12 : 7 m³ de tiges, soit 8000 tiges

3.3. Risques de dissémination

Afin de limiter les risques de dissémination de la plante durant l'expérimentation, Concept.Cours.d'EAU était présent à chaque étape nécessitant la manipulation de produits infestés : prélèvement de rhizomes, intégration des graines, des tiges et des rhizomes, retournements mécaniques, évacuation, épandage.

Une inspection des engins ainsi qu'un nettoyage manuel ont été réalisés lorsque cela était nécessaire. Sur la plateforme, un raclage du sol a été effectué après chaque déplacement de matériaux envahis pour éliminer les fragments de la plante pouvant être présents sur le sol.

3.4. Intégration dans le procédé industriel

Il a été choisi d'intégrer une très grande quantité de propagules et de graines, afin de travailler avec des volumes importants de compost expérimental et ainsi tenir compte de l'hétérogénéité des produits en cours de compostage.

Afin de réduire les risques de dissémination via le broyeur à végétaux, les rhizomes et les tiges n'ont pas été broyés (voir paragraphe 5.5) contrairement aux autres végétaux qui arrivent sur la plateforme. Le fait de ne pas réaliser cette étape a, en outre, eu l'avantage de moins blesser les tissus créant ainsi des conditions plus favorables à la survie des rhizomes et des tiges. Moins de 24 h, après leur récolte, les végétaux ont ainsi été intégrés en l'état dans le tas de compost.

Pour des raisons pratiques liées à la saisonnalité et à la croissance de la plante, l'expérimentation s'est déroulée en deux grandes étapes :

- une première étape de compostage des graines et rhizomes démarrée en décembre 2016 ;
- une seconde étape de compostage des tiges démarrée en juin 2017.

3.4.1. Essai de compostage des rhizomes et des graines

Le 15 décembre 2016, 40 m³ de compost frais ayant subi un mois de fermentation ont été mélangés à 10 m³ de rhizomes récoltés la veille. Les matériaux ont été brassés à la chargeuse afin d'obtenir un mélange assez homogène.

Ce produit a ensuite été étalé au sol sur une surface d'environ 100 m² sur laquelle 1,3 millions de graines de renouées asiatiques ont été semées à la volée de manière à répartir les graines sur toute la surface.



Ainsi, un stock infesté à 20% (v/v) par des rhizomes et contenant environ 26 000 graines par m³ de compost a été obtenu. Les matériaux ont été mis en tas (3 m de haut) et intégrés dans la chaîne de production. Ils ont été déposés sur la zone ventilée, accolés au reste du tas et recouverts par des matériaux, subissant ainsi le même traitement que le reste du compost.

Pour assurer la traçabilité du lot infesté pendant l'expérimentation et limiter les risques de dispersion de la plante, le stock a été mesuré, marqué au sol et délimité par des jalons. De plus, il a été placé en bordure du tas pour permettre de réaliser des observations. Les montées en température étant plus faibles en surface du tas qu'à l'intérieur, cette situation est plus favorable à la survie des graines et rhizomes.



Figure 13 : mélange de rhizomes et de compost frais



Figure 14 : ensemencement des graines



Figure 15 : homogénéisation des matériaux à la chargeuse



Figure 16 : mise en andains du stock infesté



Figure 17 : stock de compost infesté par les rhizomes et les graines



Figure 18 : intégration du lot infesté dans la chaîne de production

Une fois intégré dans la chaîne de production, le lot infesté a été soumis à six semaines de ventilation forcée et à deux retournements mécaniques réalisés après trois et six mois de compostage. Ces retournements mécaniques ont consisté à avancer le tas à la chargeuse. A chacune de ces opérations, une marge a été prise pour éviter que des rhizomes ou des graines soient dispersés dans le reste du tas de compost. Ainsi, du fait de cette dilution, le volume total de matériaux infesté est passé de 50 m³ à environ 180 m³ après les deux retournements.



Figure 19 : retournement du lot infesté par les rhizomes et les graines – juin 2017

Après huit mois et demi de compostage, le produit n'a pas passé la dernière étape de criblage. Il a en effet été estimé que cette étape n'avait pas d'intérêt pour l'essai, car le criblage était trop grossier pour supprimer complètement tout fragment végétatif susceptible de régénérer la plante. Par contre, cela aurait conduit à éliminer du stock expérimental une grande partie des rhizomes introduits au départ puisque le criblage final retire de nombreux déchets ligneux. C'est pourquoi le compost obtenu était beaucoup plus "fibreuse" et contenait plus de déchets plastiques qu'un compost habituel.

Le compost expérimental a donc directement été déplacé sur un site du département localisé aux Viviers-du-Lac (73) afin d'effectuer un suivi des éventuelles repousses (voir paragraphe 3.5.4). Le volume total évacué a été estimé à 180 m³ (63,2 T).

Tableau 1 : déroulement des opérations – compost de graines et de rhizomes

	2015/2016	déc.-16	janv.-17	févr.-17	mars-17	avr.-17	mai-17	juin-17	juil.-17	août-17	sept.-17
récolte des graines											
récoltes des rhizomes											
intégration des graines et des rhizomes											
ventilation forcée											
retournements mécaniques											
évacuation											

De plus, dans le but d'effectuer des tests de germination tout au long du procédé, dix sachets de 100 graines ont été préparés et enfouis dans le compost dès le début de l'expérimentation, à des profondeurs variant entre 30 et 50 cm. Les sachets ont été fabriqués avec de la toile en nylon, perméable à l'air et permettant ainsi les échanges gazeux (Bader 2017, Ecole Supérieure d'Agriculture Angers Loire 2017). Ils ont été repérés avec de la rubalise et du fil en acier pour pouvoir être récupérés.

Durant les trois premiers mois de compostage, sur les dix sachets de graines incorporés dans le compost, sept ont été perdus (section du fil en acier, probablement due au poids des matériaux rajoutés au-dessus du tas après l'incorporation des sachets). Dix nouveaux sachets de graines ont donc été préparés et incorporés dans le compost en mars 2017, soit trois mois après le début de l'expérimentation. Ils ont été reliés à des piquets en bois grâce à du fil nylon pour permettre de les retrouver plus facilement.



Figure 20 : sachet en toile nylon contenant 100 graines

Les sachets de graines ont été retirés à différentes périodes et des tests de germination ont été effectués :

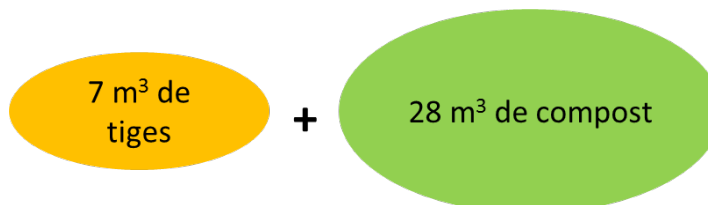
- **modalité A** : du 15 décembre 2016 au 22 août 2017, 36 semaines, soit toute la durée du traitement (3 répétitions) ;
- **modalité B** : du 24 mars 2017 au 22 août 2017, soit 22 semaines de compostage après le 1^{er} retournement (6 répétitions) ;
- **modalité C** : du 24 mars 2017 au 1^{er} juin 2017, soit 10 semaines de compostage après le 1^{er} retournement (4 répétitions).

Tableau 2 : déroulement des opérations : compostage des graines en sachets

	2015/2016	déc.-16	janv.-17	févr.-17	mars-17	avr.-17	mai-17	juin-17	juil.-17	août-17	sept.-17
récolte des graines											
ventilation forcée											
retournements mécaniques											
compostage des graines en sachets - mod A											
compostage des graines en sachets - mod B											
compostage des graines en sachets - mod C											

3.4.2. Essai de compostage des tiges

Les tiges de renouées du Japon récoltées le 28 juin 2017 ont directement été mélangées à du compost frais à leur arrivée sur la plateforme de compostage. Elles ont été intégrées dans les mêmes proportions que les rhizomes, soit 20% (v/v) de tiges.



Le mélange a été brassé à la chargeuse, mis en tas (hauteur = 3,5 m) sur une zone ventilée puis accolé au reste du tas et recouvert par des matériaux afin d'être complètement intégré dans la chaîne de production et subir les mêmes conditions que le reste du tas.

Comme pour l'essai sur les rhizomes et les graines, le stock a été mesuré, marqué au sol et délimité par des jalons pour assurer la traçabilité du lot infesté et limiter les risques de dispersion de la plante. Il a aussi été placé en bordure du tas pour permettre de réaliser des observations. Les montées en température étant plus faibles en surface du tas qu'à l'intérieur, cette situation est plus favorable à la survie des tiges.



Figure 21 : mélange des tiges et du compost frais



Figure 22 : homogénéisation



Figure 23 : intégration du stock infesté par des tiges dans la chaîne de production

Le lot infesté par des tiges a ensuite été soumis à six semaines de ventilation forcée et a subi un retournement mécanique réalisé après trois mois de compostage.

Comme pour le compost de rhizomes et de graines, une marge a été prise lors du retournement pour éviter que des tiges soient dispersées dans le reste du tas de compost. Ainsi, du fait de cette dilution, le volume total de matériaux infestés par des tiges est passé de 35 m³ à environ 140 m³ suite à cette opération.



Figure 24 : retournement du stock infesté par des tiges
(septembre 2017)

Tableau 3 : déroulement de l'essai de compostage des tiges

	2015/2016	juin-17	juil.-17	août-17	sept.-17	oct.-17	nov.-17	déc.-17
récolte des tiges								
intégration des tiges								
ventilation forcée								
retournements mécaniques								
évacuation								

En novembre 2017, en raison de contraintes de site, le stock de tiges n'a pas pu subir un retournement mécanique, il est donc resté sur place et la ventilation forcée a été mise en fonctionnement. Elle a pour rôle d'oxygéner le tas, mais sans l'avantage d'homogénéiser les matériaux comme un retournement mécanique classique. Cette opération est donc plus favorable à la survie des tiges.

3.5. Suivi

3.5.1. Température dans le compost

Des mesures de températures ont été réalisées par SUEZ grâce à une sonde de température reliée par WIFI (intervalle d'enregistrement : dix minutes). Cette sonde était placée au-dessus des lots infestés par les rhizomes, graines et tiges, et placée à environ 1 m de profondeur.



Figure 25 : contrôle de la température

3.5.2. Evolution des diaspores durant le processus

Des suivis réguliers ont été effectués durant tout le processus de compostage afin d'observer des éventuels bouturages de tiges et de rhizomes à la surface du compost. La détection des éventuels semis était impossible en raison de leur très petite taille. Ces visites étaient effectuées tout les mois pour le compost de graines et de rhizomes et toutes les semaines en juillet et août pour le compost de tiges.

Lors du premier retournement de mars 2017, des prélèvements de rhizomes ont été effectués afin d'évaluer leur taux de dégradation entre l'intérieur du tas (à plus de 45 cm de profondeur) et en surface (situés à moins de 45 cm de profondeur). Chaque échantillon était composé de 100 rhizomes qui ont été coupés en deux dans le sens longitudinal pour les classer selon trois catégories (Boyer et Gerber 2013) : potentiellement vif (persistance de tissus blancs non dégradés), morts (coloration noire de tous les tissus), pourrissants (coloration brune ou violette des tissus). Il a été rajouté des critères visuels liés non au pourrissement, mais à la dessiccation des rhizomes en distinguant des rhizomes complètement secs ou en train de sécher.

Les prélèvements ont été réalisés de manière à obtenir un échantillonnage représentatif :

- pour les rhizomes de surface, dix quadras de 40 cm x 40 cm, répartis sur toute la surface du tas, ont été délimités. Dix rhizomes ont ensuite été récoltés dans chacun de ces quadras ;
- pour prélever les rhizomes situés à l'intérieur du tas (à plus de 45 cm de profondeur), le produit a été étalé formant une couche d'environ 50 cm, des rhizomes ont ensuite été récoltés sur toute la surface.

De même, lors du retournement du stock de tiges en septembre 2017, le produit a été étalé au sol et un prélèvement de 100 tiges a été réalisé sur toute la surface pour observer leur état.

3.5.3. Tests de germination

Le 4 novembre 2016, soit quinze jours après la seconde récolte de graines, des tests ont été menés pour vérifier que celles-ci pouvaient germer. Elles ont été mises en culture dans du terreau, à la lumière, à une température d'environ 21°C et arrosées quotidiennement. L'essai a été réalisé sur quatre pots contenant chacun 100 graines de renouées.

Par la suite, des tests de germination des graines contenues dans les sachets introduits dans le compost ont été réalisés. A leur sortie du compost, les graines ont été rincées puis séchées sur papier absorbant dans un endroit sec. Elles ont ensuite été réparties dans des boîtes de Petri® et mises à germer sur du papier filtre Whatmann® grade 181, humidifié régulièrement pendant 28 jours. Un éclairage par néon a permis de régler les conditions d'éclairement en une alternance de 16 h de lumière et 8 h d'obscurité. La température de la pièce ne pouvait néanmoins pas être contrôlée. Lors des tests (juin et août 2017), celle-ci variait entre 25 et 33°C.

La capacité de germination des graines ayant subi le compostage a été comparée à celle de graines témoins, stockées dans un endroit sec, à l'abri de la lumière à une température moyenne d'environ 14°C. Ces graines témoins ont été préparées de la même manière (rinçage, séchage) et mises à germer dans les mêmes conditions.



Figure 26 : tests de germination – juin 2017

3.5.4. Evolution du compost après traitement

Le 4 septembre 2017, après huit mois et demi de compostage, le produit contenant les rhizomes et les graines de renouées du Japon a été évacué sur un site du Département aux Viviers-du-Lac (73). La plateforme a été inspectée pour s'assurer que le compost ne serait pas épandu sur une surface déjà colonisée par des renouées. Seuls quelques pieds de renouées étaient présents et l'épandage a été effectué à plus de 10 m de ceux-ci. Par ailleurs, plusieurs pieds d'ambrosie ont aussi été détectés sur la plateforme.

Le compost a été épandu sur une surface d'environ 600 m² sur une épaisseur moyenne de 30 cm. Il a ensuite été tassé pour permettre de conserver au maximum l'humidité du produit. Après tassement, l'épaisseur moyenne du compost a été estimée à 22 cm.



Figure 27 : épandage du compost



Figure 28 : tassement

Cinq zones témoins, de dimensions 1 m x 1 m, ont été réparties sur la surface épandue. Elles ont été délimitées par des jalons et de la rubalise. Sur chaque zone témoins, onze rhizomes récoltés deux jours avant et stockés dans un endroit frais et sec, ont été enterrés à environ 15 cm de profondeur. Leurs longueurs étaient comprises entre 15 et 35 cm et leurs largeurs entre 3 et 12 mm. Chaque rhizome contenait au minimum quatre nœuds (dix au maximum). Ils ont été repérés avec de la rubalise. Chaque zone témoin a aussi étéensemencée avec 1000 graines de renouées asiatiques.



Figure 29 : préparation des zones témoins



Figure 30 : enfouissement des rhizomes témoins



Figure 31 : ensemencement des placettes témoins



Figure 32 : zone d'épandage

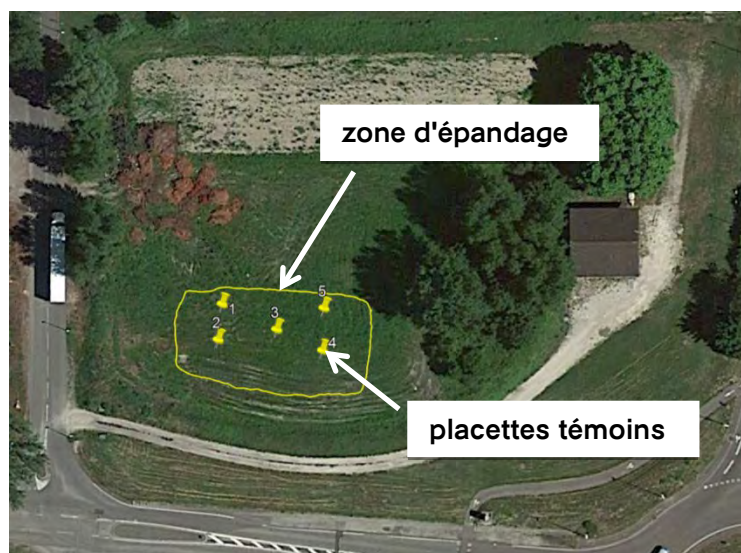


Figure 33 : vue aérienne du site avant épandage
(juillet 2017 - GoogleEarth®)

Le site a ensuite été visité chaque semaine pendant les mois de septembre et octobre 2017 pour détecter des repousses ou des semis, sans les enlever. A chacune de ces visites, toute la parcelle était examinée ainsi que les placettes témoins. Les semis observés lors d'une visite étaient repérés en plaçant un petit bâtonnet coloré, afin de pouvoir les distinguer de nouveaux apparus par la suite.

Une dernière inspection très approfondie de la zone a été réalisée le 2 octobre 2017. Les semis éventuels ont alors été recherchés sur six bandes d'1 m de large par 13 à 15 m de long réparties sur toute la parcelle, soit 82 m² couvrant 14 % de la surface. La détection des semis est difficile et l'opération fastidieuse. L'observateur doit en effet placer son œil à environ 25 cm du sol pour pouvoir les repérer. Sur les bandes, un premier passage, nez au sol, a été réalisé, puis un second passage en ratissant le substrat sur 2 cm d'épaisseur.

Les boutures de rhizomes ont également été recherchées dans des fouilles sur toute l'épaisseur du compost au niveau de 18 sondages répartis sur toute la surface.



Figure 34 : inspection approfondie du compost pour repérer d'éventuels semis



Figure 35 : fouilles du compost (18) pour détecter d'éventuelles boutures

4. RESULTATS

4.1. Montée en température

4.1.1. Compost avec des graines et des rhizomes

Durant, les six premières semaines pendant lesquelles la ventilation forcée était en marche, la température moyenne dans le tas de compost était de 74°C malgré les conditions hivernales, elle est descendue, au minimum, à 68°C pendant cette période. Au cours du mois qui a suivi, la température est restée stable, à une moyenne de 72°C. Après le premier retournement, qui provoque une aération du produit, une hausse de la température a été observée, elle est ensuite restée supérieure à 55°C pendant un mois. Après le deuxième retournement, des données sont manquantes, mais la température est au moins restée supérieure à 50°C pendant quatre jours consécutifs.

Les montées en température observées sont nettement supérieures aux conditions minimales imposées par l'arrêté du 22 avril 2008 fixant les règles que doivent suivre les installations de compostage soumises à autorisation³. On peut donc supposer qu'elles sont plus favorables à la dévitalisation des diaspores et ce, même pendant les périodes les plus froides de l'année.

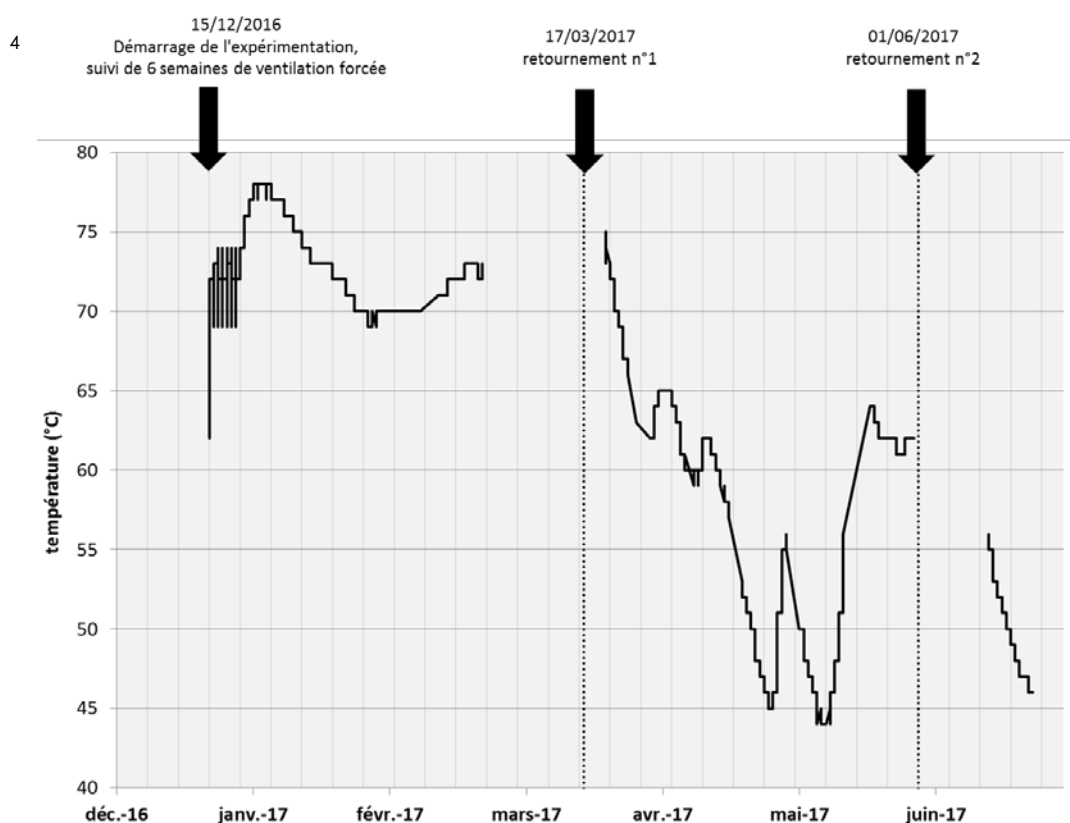


Figure 36 : suivi de température – stock de rhizomes et de graines

³ deux semaines de ventilation forcée au cours desquelles la température doit dépasser 55°C pendant trois jours consécutifs et un retournement à l'issue duquel la température doit être supérieure à 50°C pendant 24 h

⁴ Les sondes de température sont retirées dès le démarrage de l'opération de retournement du compost qui dure environ quatre semaines

4.1.2. Compost avec des tiges

Le même constat peut être fait sur les montées en température dans le compost avec des tiges, malgré la saisonnalité différente. Au cours des six premières semaines de ventilation forcée, la température n'est pas descendue en dessous de 69°C, avec une moyenne de 74°C. Elle est ensuite restée stable pendant le mois qui a suivi (température moyenne 72°C et température minimale : 62°C). Après le retournement de septembre 2017, la température est restée supérieure à 55°C pendant au moins onze jours consécutifs, atteignant même des températures de plus de 70°C pendant trois jours consécutifs.

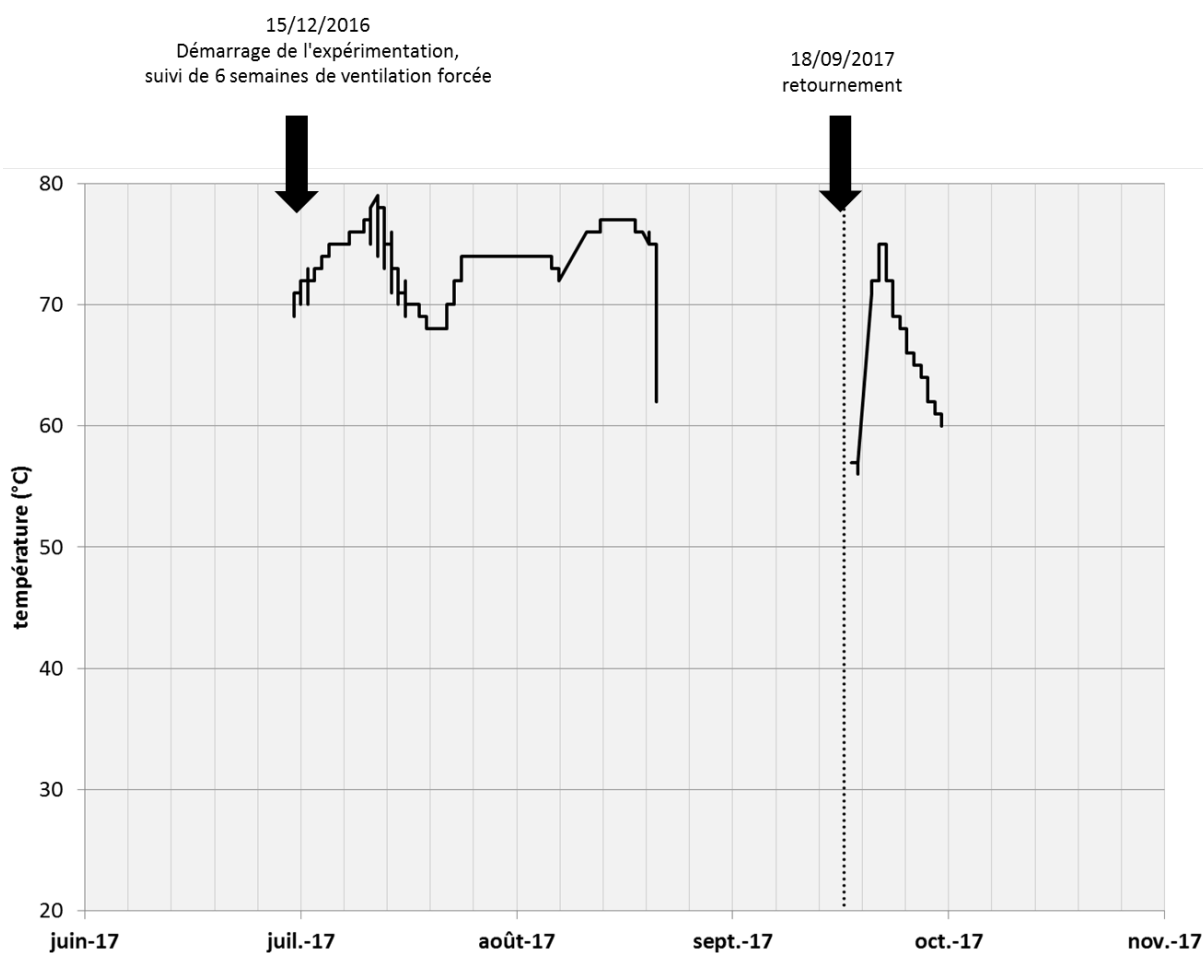


Figure 37 : suivi de température – stock de tiges

4.2. Effet sur les rhizomes

4.2.1. Suivi des rhizomes en cours de compostage

4.2.1.1. Phase 1 – décembre 2016 / mars 2017

A la mi-janvier 2017, soit trois semaines après l'intégration des rhizomes dans le compost, des bouturages de rhizomes ont été observés entre 5 et 30 cm de profondeur. Sur 5 sondages réalisés, 3 ont révélé des pousses sur 4 rhizomes différents. La chaleur du compost a probablement déclenché la croissance de la plante malgré les conditions hivernales.

En février 2017, soit deux mois après le début de l'expérimentation, le développement de tiges et de premières feuilles a été observé en surface du tas.



Figure 38 : bouturage d'un rhizome après trois semaines de compostage



Figure 39 : développement de tiges et de feuilles en surface du tas après deux mois de compostage

En mars 2017, des rhizomes ayant produit des tiges ont été observés jusqu'à 50 cm de profondeur.



Figure 40 : pousses de renouées du Japon sur le tas de compost après trois mois de compostage (mars 2017)

4.2.1.2. Premier retournement mécanique (mars 2017)

Lors du premier retournement mécanique, l'étalement du produit a permis de constater qu'aucun rhizome situé à plus de 50 cm de profondeur à l'intérieur du tas n'avait bouturé contrairement aux rhizomes situés à la surface du tas (Figure 40).

Des prélèvements de rhizomes ont été réalisés afin d'évaluer leur taux de dégradation apparente (voir paragraphe 3.5.2). Ils ont permis de mettre en évidence deux processus de dévitalisation des rhizomes en fonction du taux d'humidité : pourrissement dans les zones les plus humides en surface de l'andain et dessiccation dans les zones les plus sèches à l'intérieur.

La Figure 41 présente les résultats obtenus. Ainsi, sur des échantillons composés d'une centaine de rhizomes, les taux suivants ont été calculés :

- 57% de rhizomes en surface du tas avec des tissus non encore dégradés ou desséchés contre 5% à l'intérieur du tas ;
- 7% de rhizomes morts en surface du tas contre 26% à l'intérieur du tas ;
- 36% de rhizomes en cours de pourrissement/dessiccation en surface du tas contre 69% à l'intérieur du tas.

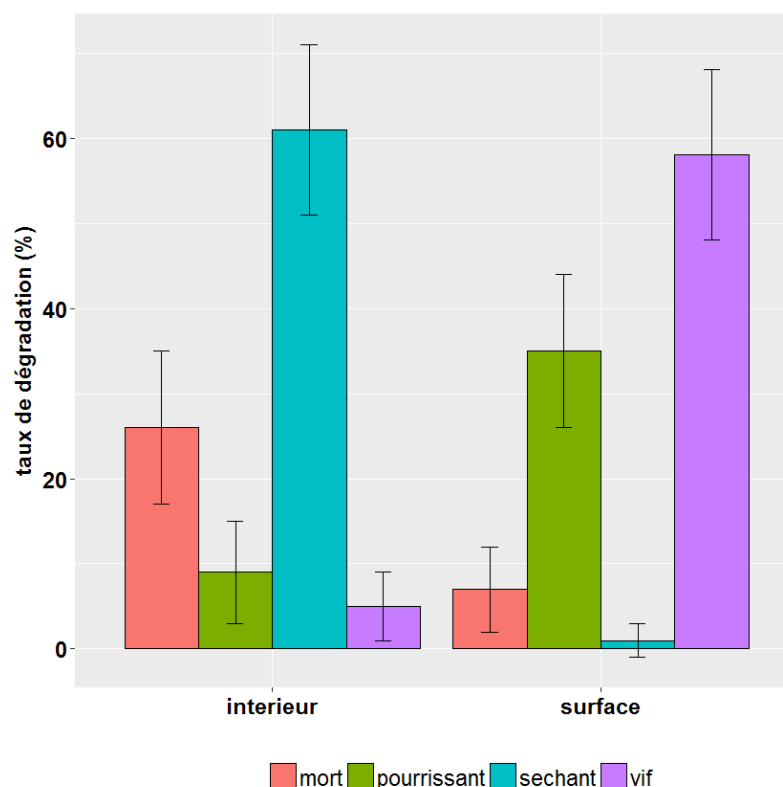


Figure 41 : Comparaison de l'état des rhizomes entre l'intérieur du tas et sa surface après trois mois de compostage – les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95%

Au sein du compost et malgré les températures élevées avoisinant les 70°C pendant au moins deux mois, une proportion non négligeable (5%) de rhizomes possèdent des tissus non encore dégradés ou desséchés et sont donc potentiellement vifs.

Les différences de résultats entre la surface et l'intérieur de l'andain sont significatives et témoignent d'une forte hétérogénéité des vitesses et des types de processus mis en jeu.

Ainsi à l'intérieur du tas, les fortes montées en température permettent de rapidement dévitaliser les rhizomes par dessiccation, alors qu'elles ne sont pas suffisantes en surface pour permettre un tel phénomène. En surface, la plupart des rhizomes restent vifs même si le taux d'humidité élevé a permis le pourrissement d'une certaine partie d'entre eux.

4.2.1.3. Phase 2 – mars à mai 2017

En mai 2017, soit après cinq mois de compostage et un retournement mécanique, 7 repousses de renouées, issues de fragments distincts de rhizomes, ont été repérées en surface du tas. Elles étaient toutes situées en bordure du tas, près de la glissière en béton délimitant la surface de traitement (cf. Figure 42) et dans la zone de chevauchement entre les positions du tas avant et après le premier retournement.

Ailleurs, aucune repousse n'a été observée. Il s'agissait donc probablement de rhizomes restés en place depuis le début de l'essai, n'ayant pas été déplacés lors du retournement et n'ayant donc pas subi les températures élevées liées au compostage.

Certaines repousses ont démarré sur de très petits fragments de rhizomes (< 1 cm) (cf. Figure 43).



Figure 42 : pousses de renouées du Japon après cinq mois de compostage et un retournement mécanique (mai 2017)



Figure 43 : bouture d'un très petit fragment de rhizome après cinq mois passé en surface du tas de compost (moins de 30 cm) (mai 2017)

4.2.1.4.Phase 3 – mai à septembre 2017

De mai à septembre 2017, soit après le second retournement mécanique, aucune pousse de renouées du Japon n'a été observée sur le tas de compost.



Figure 44 : rhizomes morts en surface du tas de compost après 8 mois de compostage (juillet 2017)

4.2.2. Suivi des rhizomes sur le compost épandu

Après huit mois et demi de compostage et deux retournements, le produit dans lequel avait été initialement introduit 10 m³ de rhizomes, a été épandu sur une surface d'environ 600 m² et une épaisseur moyenne de 22 cm après tassement.

Pendant les deux mois qui ont suivi cet étalement, les pluies irrégulières (en moyenne 10 mm par semaine) ont permis d'arroser le compost et ont été suffisantes pour faire pousser les rhizomes témoins (Figure 45). Les interdictions d'arrosage n'ont pas permis de compléter ces apports naturels.

Par ailleurs et malgré la période de fin d'été-début d'automne, les températures ont été particulièrement favorables à la pousse des plantes.

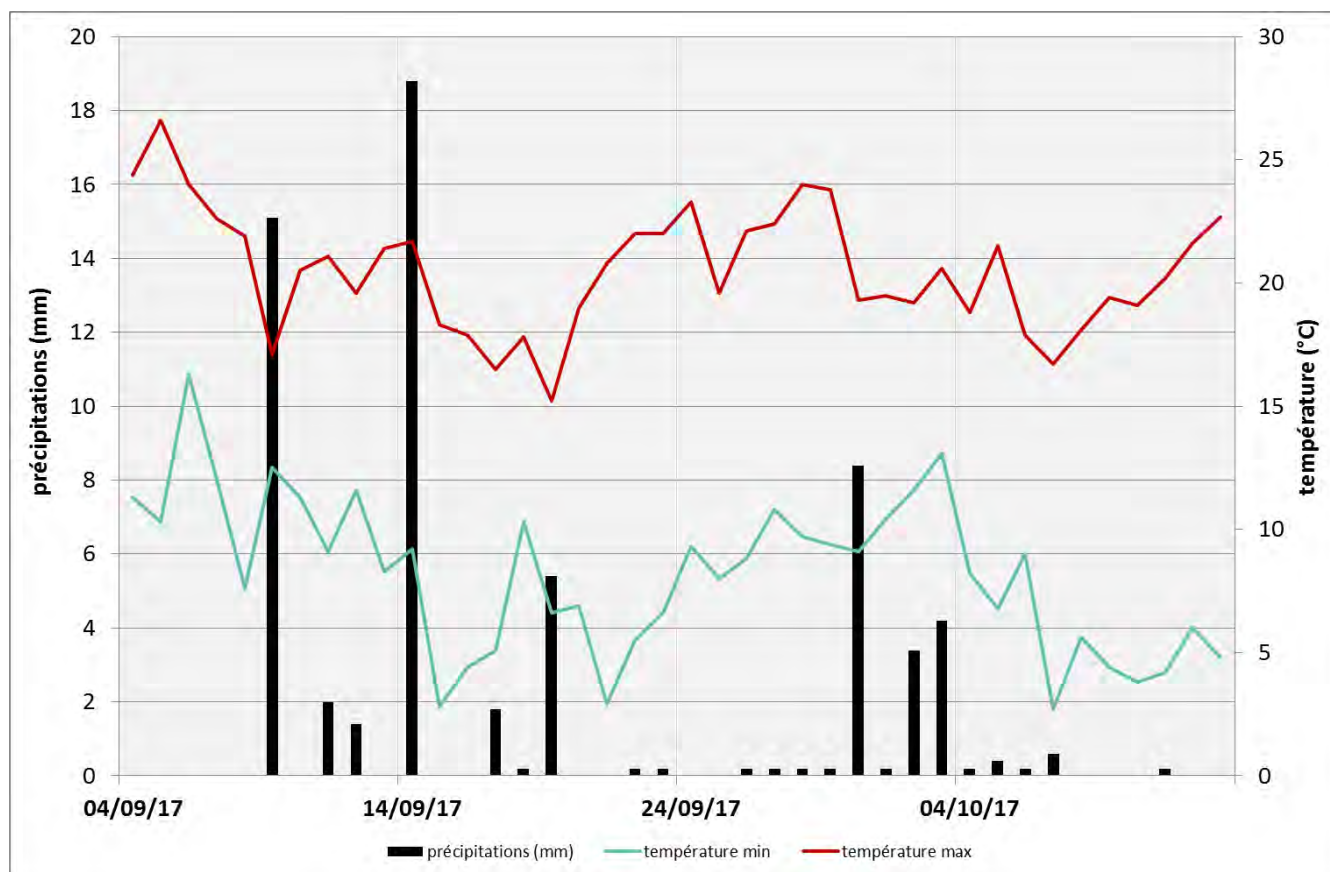


Figure 45 : données climatiques à la station du Viviers du Lac pour les mois de septembre et octobre 2017
(source : Météo France)

Sur les placettes témoins, dans lesquelles avaient été enterrés des rhizomes vifs, des repousses ont été observées dès la deuxième semaine de suivi, juste après un épisode de pluie intense. En deux mois, le nombre de pousses s'élevait en moyenne à 16 /m² dans les zones témoins (écart-type=3). Ainsi, les conditions étaient propices au bouturage de rhizomes, avec en moyenne une à deux pousses de tiges se développant par rhizome enterré.

Or, en dehors des zones témoins, les résultats sont significativement différents (test de Student, p-value=0,0003) puisqu' aucune repousse de renouées n'a été observée sur une surface prospectée d'environ 600 m² que ce soit en surface ou en profondeur (18 sondages effectués). On peut donc en conclure que le procédé a permis de provoquer 100% de mortalité sur les 10 m³ de rhizomes compostés.

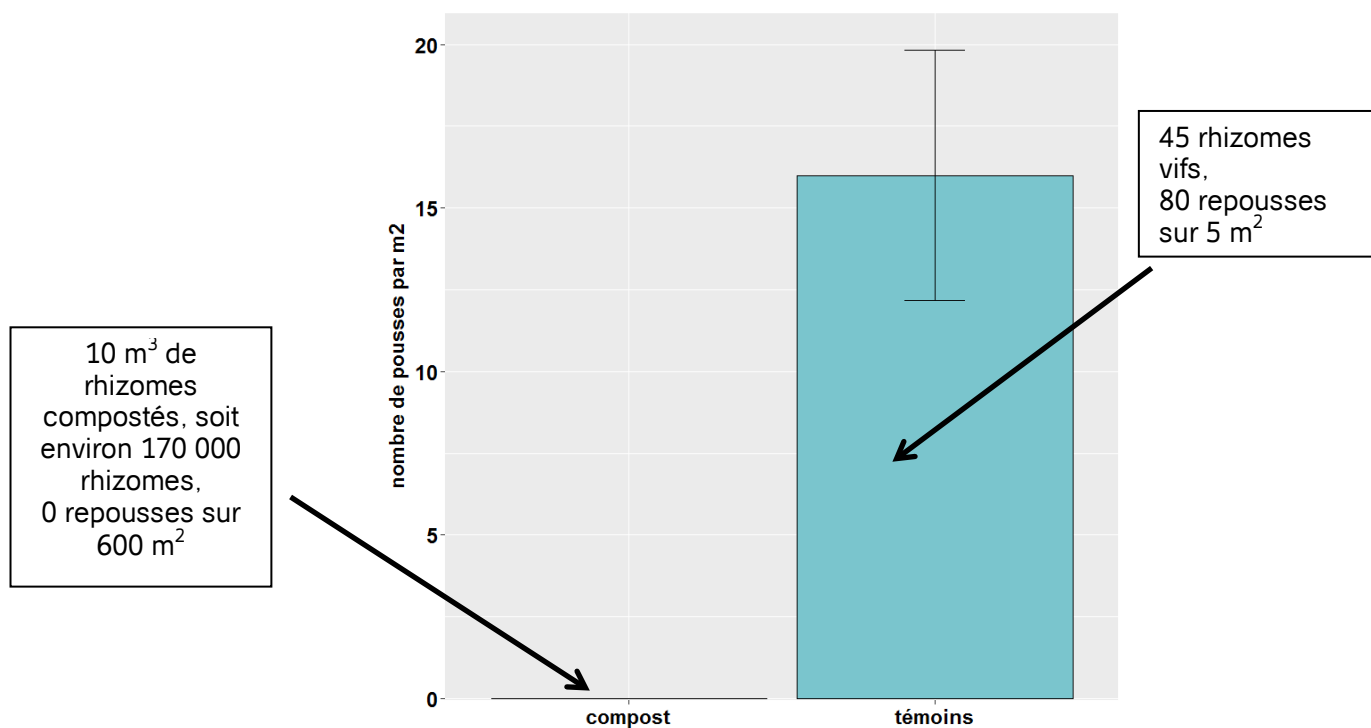


Figure 46 : effet du compostage sur le nombre de repousses



Figure 47 : pousses issues de rhizomes vifs sur les zones témoins (10/10/2017)



Figure 48 : rhizomes morts après compostage



Figure 49 : bouturage de rhizomes sur les zones témoins et absence de bouturage en dehors (15/10/2017)

4.3. Effet sur les graines

4.3.1. Vérification de la capacité de germination des graines

Les essais de mise en culture dans du terreau de graines venant juste d'être récoltées (automne 2016) ont montré que celles-ci étaient capables de produire des semis. Néanmoins, le nombre de semis est très faible : seulement 13 semis pour 400 graines plantées en 25 jours de culture, laissant supposer que les graines récoltées sont peu viables.

Tableau 4 : comptage des semis après mise en culture de graines suite à la récolte d'octobre 2016

	nombre total de graines	nombres de semis
rep 1	100	6
rep 2	100	1
rep 3	100	0
rep 4	100	6
moyenne		3
écart-type		3,2

Ces résultats sont confirmés par les tests de germination effectués dans des boîtes de Petri® après plusieurs mois de stockage. En effet, des germinations ont été observées sur tous les échantillons de graines témoins (8 répétitions, n=100). En moyenne, le taux de germination pour les graines témoins est de 5% (écart-type = 1,9). Cette valeur est faible comparée à celles généralement citées dans la littérature pour les graines issues de *Fallopia japonica*. Par exemple, un article de 2003 évoque des taux de germination compris entre 47% et 83% (Forman et Kesseli 2003). De même, des taux nettement supérieurs à 50% et atteignant les 100% ont été reportés par certains auteurs pour un hybride, *Fallopia x. bohemica* (Crosaz 2008, Le Guen et al. 2009).

Néanmoins, une étude réalisée en Allemagne en 2011 (Engler et al. 2011) a mis en évidence des différences significatives des taux de germination liées à des différences morphologiques chez *Fallopia x. bohemica* (ratio poids/longueurs et couleurs des tépales) ainsi qu'une variabilité dans les taxons parents conduisant à la production de graines immatures avec un faible succès de germination. Des taux de germination de l'ordre de 9% (95%, IC=5-15, n=152) pour des graines aux tépales brunâtres ont par exemple été observées dans cette étude. Les auteurs suggèrent que ces différences s'expliquent par des croisements entre les différents clones, conduisant à une aneuploïdie. Ainsi, ce phénomène pourrait expliquer les faibles taux de germination obtenus au cours de l'expérimentation.

Tableau 5 : évaluation du taux de germination moyen pour les graines témoins

	nombre de graines	taux de germination (%)
répétition 1	100	4
répétition 2	100	6
répétition 3	100	3
répétition 4	100	6
répétition 5	100	6
répétition 6	100	8
répétition 7	100	5
répétition 8	100	2
moyenne		5
écart-type		1,9
Intervalle de confiance (95%)		[3,7-6,3]

4.3.2. Tests de germination sur les sachets de graines introduits dans le compost

L'effet du compostage sur la viabilité des graines a pu être mis en évidence grâce aux essais de germination réalisés sur les sachets de graines introduits dans le compost. Un premier test statistique (Kruskal-Wallis) a montré une différence significative (p-value = 0.019) parmi les modalités étudiées (A : 36 semaines de compostage, B : 22 semaines de compostage, C : 10 semaines de compostage et T : graines témoins). Un second test (Dunn) a ensuite été réalisé, confirmant des différences significatives entre les taux de germination des graines témoins et ceux des graines ayant passé trente-six semaines et vingt-deux semaines dans le tas de compost (p-value=0.0003 et 0.0002 respectivement). Les montées en température obtenues dans le tas de compost ont donc permis de faire diminuer la capacité germinative des graines.



Figure 50 : graines ayant passé huit mois et demi dans le compost (gauche) – graines témoins (droite) – 28 jours de mise en culture

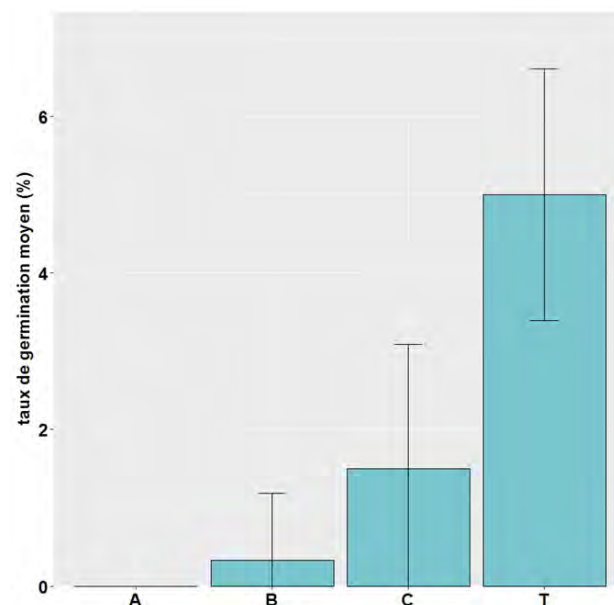


Figure 51 : Influence du compostage sur le taux de germination des graines (A : 36 semaines de compostage, B : 22 semaines de compostage, C : 10 semaines de compostage, T : graines témoins) – les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95%

Tableau 6 : statistiques obtenues lors des tests de germinations

modalité	nombre de répétitions	nombre de graines par répétitions	taux de germination moyen (%)	écart-type	Intervalle de confiance à 95%
T	8	100	5,0	1,9	[3,4-6,6]
A	3	100	0,0	0,0	n.d.
B	6	100	0,3	0,8	[0-1,2]
C	4	100	1,5	1,0	[0-3,1]

Après dix semaines passées dans le tas de compost, certaines graines étaient encore viables puisque 6 germinations ont été observées sur les 400 graines mises en culture. Ainsi, dix semaines de compostage à des températures dépassant 55°C à l'intérieur du tas pendant un mois ne sont pas suffisantes pour dévitaliser les graines situées à la surface.

De même, sur les 600 graines ayant passé cinq mois dans le compost, deux d'entre elles ont germé. Ces graines en sachet sont restées en surface du tas et elles n'ont pas suivi, comme les autres graines, le processus d'homogénéisation du compost lors des retournements. Elles n'ont donc pas été soumises à des températures aussi élevées que la matière située à l'intérieur du tas. Mais elles témoignent de la possibilité que des graines soient encore viables en surface du tas après cinq mois de compostage.

Aucune germination n'a par contre été constatée sur les graines ayant passé trente-six semaines à la surface du compost. Ce résultat ne permet néanmoins pas de conclure en une dévitalisation complète des graines en fin de processus. En effet, le nombre de graines ayant permis de faire le test (300) est trop faible devant les taux de germination obtenus après cinq mois de compostage, de l'ordre de 0,3%, la différence entre les deux modalités n'est donc pas significative.

4.3.3. Suivi des semis sur le compost

Après huit mois et demi de compostage et deux retournements mécaniques, le produit dans lequel avaient été initialement introduites 1,3 millions de graines, a été épandu sur une surface d'environ 600 m² et une épaisseur moyenne de 22 cm après tassement. Au cours des deux mois qui ont suivi cet étalement, des pluies irrégulières ont permis d'arroser le site et ont été suffisantes pour faire germer les graines témoins (voir paragraphe 4.2.2, Figure 45).

Dans les placettes témoins, sur lesquelles avaient été semées 1000 graines, des semis sont apparus dès la deuxième semaine de suivi, juste après un épisode de pluie intense (Figure 53). En deux mois, 8 semis en moyenne sont apparus sur chaque zone témoin (écart-type = 5). Les conditions étaient donc propices à la germination des graines avec un taux de germination de l'ordre de 0,8%. Ce taux de germination est très faible comparé à ceux obtenus lors des essais dans des boîtes de Petri. Cette différence peut être due à une disparition rapide des semis causée par de la phytophagie ou un manque d'eau, la réserve utile en eau du compost en tant que substrat étant très faible. Ainsi tous les semis n'ont peut-être pas été comptabilisés.

En dehors des zones témoins, la fouille approfondie réalisée sur une surface de 82 m² et environ 5 cm d'épaisseur (cf. paragraphe 3.5.4) n'a révélé aucun semis. Or, le nombre de graines ayant subi le processus de compostage dans ce volume de produit est de l'ordre de 45 000. Ainsi le nombre de semis est significativement différent de celui observé sur les placettes témoins (test de Student, p-value=0.028). On peut donc conclure que le procédé a permis de provoquer 100% de mortalité des graines introduites dans le compost.

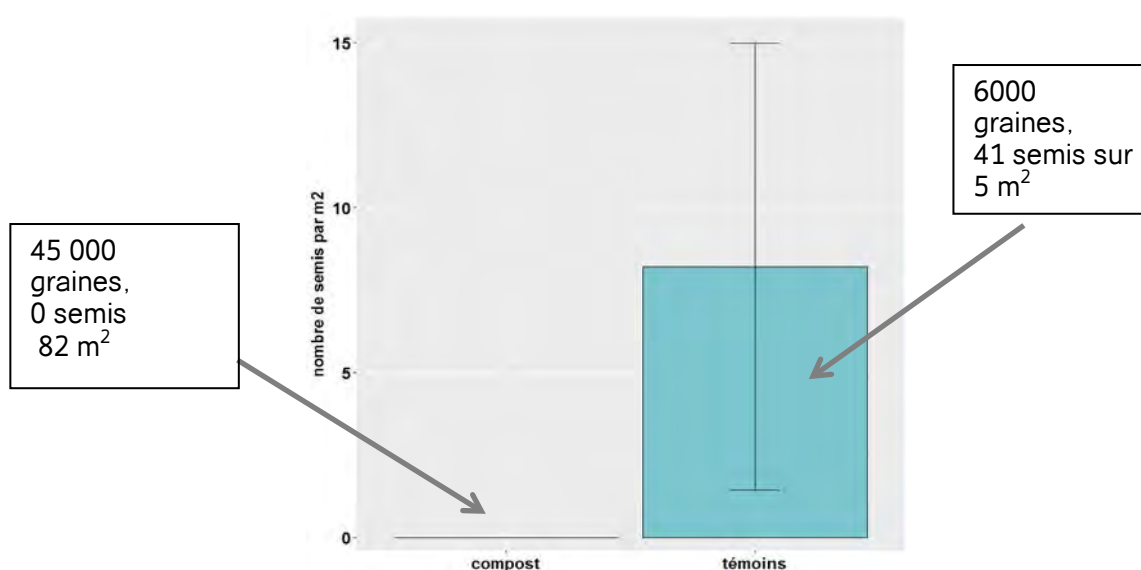


Figure 52 : effet du compostage sur le nombre de semis



Figure 53 : semis de renouée et bâtonnet de repérage du semis - la fourmi donne l'échelle

4.4. Effet sur les tiges

L'essai de compostage des tiges a débuté en juin 2017. Sur les trois premiers mois qui ont suivi l'introduction des tiges dans le compost, des épisodes de pluie réguliers ont eu lieu (Figure 54), pouvant favoriser le bouturage des tiges.

Des suivis hebdomadaires du stock de tiges ont été réalisés afin d'observer d'éventuelles boutures de tiges en surface du tas pendant la saison végétative, de juin à septembre 2017.

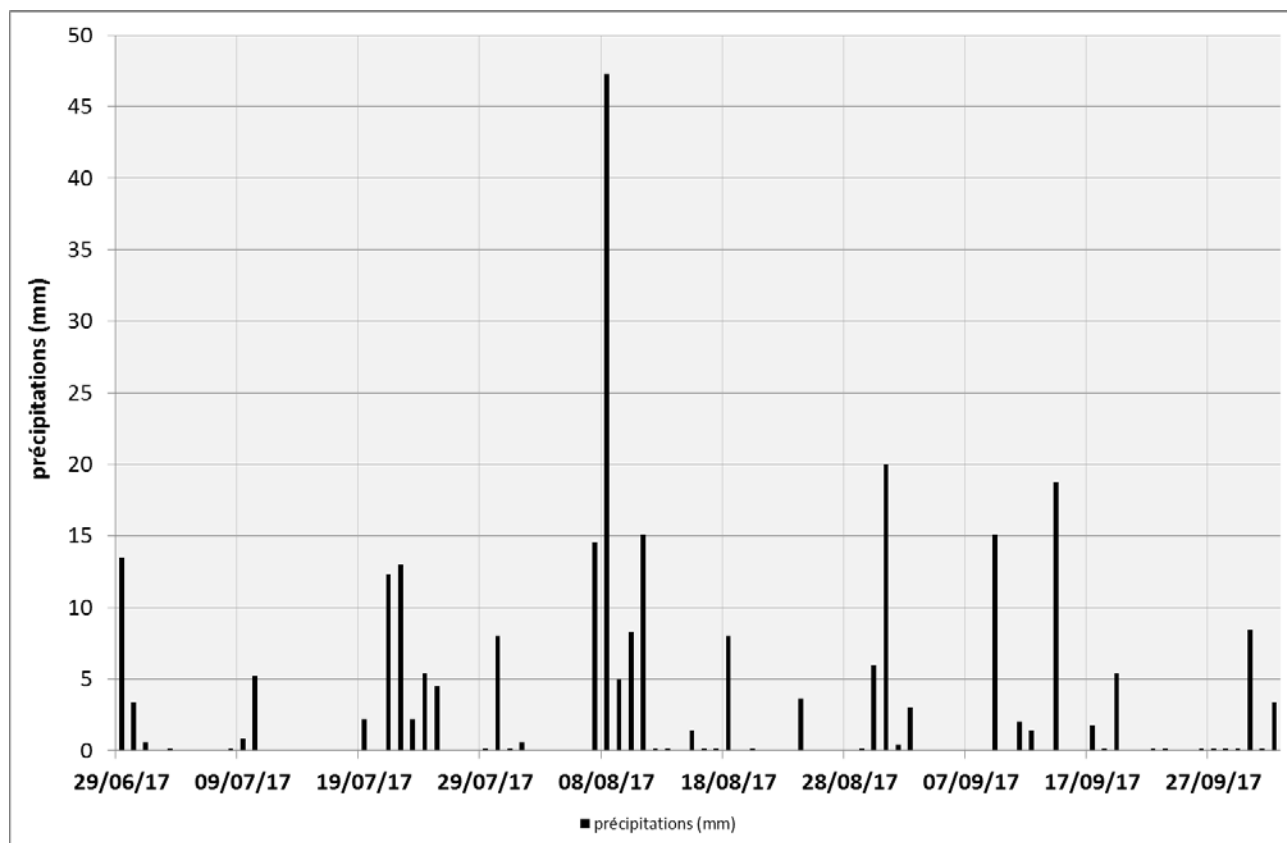


Figure 54 : suivi des précipitations à Chambéry de juin à octobre 2017 (source Météo France)

Au cours du premier mois qui a suivi l'introduction des tiges, la formation de jeunes feuilles sur certaines tiges a été observée en surface du tas mais ce phénomène était rare (observation sur deux tiges seulement) (Figure 55). Sur ces tiges, aucune production de racines n'a été observée avant qu'elles ne sèchent. Toutes les autres tiges observées sur le tas de compost étaient en train de sécher.

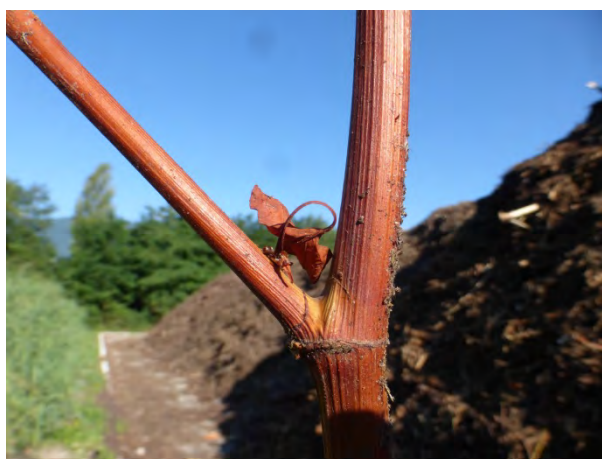


Figure 55 : formation d'une jeune feuille de renouée sur une tige en surface du tas de compost (12/07/2017)

Un mois après l'introduction des tiges dans le tas de compost, deux repousses issues d'une même tige sont apparues à la surface du tas. Cette tige était située au sol, en bordure de stock, à environ 30 cm de profondeur, dans une zone restée humide, d'environ 5 cm d'épaisseur. Cette tige était complètement verte et quelques radicelles ont été observées. Elle a ensuite été remise en place et a séché au bout d'une semaine malgré des conditions très humides.



Figure 56 : repousses sur le stock de tiges
(4 août 2017)



Figure 57 : repousses issues d'une même tige
(4 août 2017)



Figure 58 : repousses sèches (11 août 2017)

Lors du retournement du stock contenant les tiges de renouées (septembre 2017), le produit a été étalé sur une surface d'environ 35 m² sur 1 m d'épaisseur. Toutes les tiges observées étaient sèches et aucun bouturage n'a été observé (prélèvement et observations de 104 tiges). Ainsi, sur les 7 m³, soit 8000 tiges introduites dans le tas de compost en juin 2017, aucune n'a survécu après trois mois de compostage.



Figure 59 : tiges sèches, premier retournement
(18 septembre 2017)



5. DISCUSSION

5.1. Conditions de l'essai

L'expérimentation a été menée dans des conditions normales de compostage industriel pour la plateforme de valorisation des déchets verts de Chambéry-Le-Vieux.

Le traitement a duré environ huit mois, période correspondant à la durée minimale de traitement sur le site. De plus, le protocole a été établi en suivant les étapes habituelles du procédé, à savoir, six semaines de ventilation forcée puis deux retournements mécaniques à un tiers et deux tiers de la durée totale du traitement. En outre, les rhizomes et les tiges ont été mélangés à du compost classique avec une dilution suffisamment importante, initialement 20% (v/v), pour ne pas modifier les processus habituels. Enfin, les stocks expérimentaux étaient intégrés dans la chaîne de production et subissaient donc le même traitement que l'ensemble du tas.

Les montées en température auxquelles ont été soumises les diaspores sont celles habituellement observées sur la plateforme. Pendant les six premières semaines de traitement sous ventilation forcée, les températures moyennes sont de l'ordre de 70°C et descendent rarement en-dessous de 55°C pendant les deux premiers mois de traitement. A chaque retournement, l'oxygénation du tas entraîne des élévations de températures supérieures à 55°C pendant plusieurs jours consécutifs.

Lorsque des écarts par rapport au procédé ont été choisis, ceux-ci ont toujours conduit à favoriser la survie des diaspores dans le processus de compostage. Ainsi et par mesure de précaution, les tiges et les rhizomes n'ont pas été broyés, car il n'aurait pas été possible de nettoyer le broyeur. Or le broyage favorise le compostage des déchets verts. De même, les stocks infestés ont été placés en bordure du tas pour assurer leur traçabilité et permettre de réaliser les observations. Ils ont donc présenté un plus grand rapport surface/volume favorable à la survie des propagules du fait des températures plus faibles en surface.

Les conditions expérimentales sont donc conformes à celles habituellement mises en œuvre sur la plateforme de compostage de Chambéry-le-Vieux. Néanmoins, elles sont nettement plus contraignantes que celles imposées par l'arrêté du 22 avril 2008 fixant les règles que doivent suivre les installations de compostage soumises à autorisation. En effet, la réglementation exige seulement deux semaines de ventilation forcée au cours desquelles la température doit dépasser 55°C pendant trois jours consécutifs et un retournement à l'issue duquel la température doit être supérieure à 50°C pendant 24h. Par conséquent, le respect de ces seules conditions minimales ne permettrait pas la dévitalisation des diaspores de renouées asiatiques.

5.2. Dévitalisation des rhizomes

L'essai a été réalisé sur une très grande quantité de rhizomes : 10 m³ soit environ 170 000 fragments de rhizomes. Après huit mois et demi de compostage, un taux de mortalité de 100% a été obtenu. Ce taux a été confirmé par la comparaison avec 55 rhizomes témoins, vifs, qui ont donné 80 repousses après avoir été enterrés dans le compost et soumis aux mêmes conditions climatiques que ce dernier.

Ainsi, les rhizomes ne survivent pas lorsqu'ils sont intégrés dans un compost industriel, comme celui mis en œuvre sur la plateforme de compostage de Chambéry-Le-Vieux. Ce résultat est cohérent avec les essais réalisés par la FRAPNA en collaboration avec les fermes du Chosal qui concluaient en l'absence de régénération végétative des rhizomes sur un compost de sept mois (Lebert 2010, Gilles 2012).

A Chambéry-Le-Vieux, l'expérimentation a mis en évidence une forte hétérogénéité des vitesses et des processus de dégradation entre l'intérieur et l'extérieur du tas.

Après trois mois de traitement, aucun rhizome n'avait bouturé à l'intérieur du tas à plus de 50 cm de profondeur et 95% des rhizomes étaient morts ou en train de se dessécher. Les observations faites ne permettaient toutefois pas de dire si les rhizomes présentant des tissus encore vifs (5%) étaient en capacité de bouturer. Mais il semble bien que le dessèchement des rhizomes à l'intérieur du tas soit relativement rapide. En effet, une fois des rhizomes déplacés de l'intérieur vers la surface du tas par le premier retournement, aucune repousse n'a été observée. Pourtant, ces rhizomes étaient dans des conditions favorables pour bouturer, puisque de nouvelles repousses sont apparues à partir d'autres rhizomes restés en surface depuis le début du compostage, dans une zone non remaniée par le premier retournement. Trois mois passés dans la zone de cœur soumise à des élévations de température de l'ordre de 70°C, seraient par conséquent suffisants pour dévitaliser les rhizomes.

Alors qu'à l'intérieur, les rhizomes se dessèchent sous l'effet des fortes chaleurs, certains situés à la surface jusqu'à 50 cm de profondeur peuvent survivre et bouturer très longtemps, même si d'autres pourrissent dans des zones où le taux d'humidité est élevé. Ce phénomène a été observé jusqu'à cinq mois dans les zones non remaniées par des retournements. Ceci est vrai quelque soit la taille des rhizomes puisque des repousses ont été observées à partir de très petits fragments (<1 cm). Le processus de pourrissement observé en surface est ainsi beaucoup plus lent que les mécanismes de dessiccation mis en jeu à l'intérieur du tas de compost et il n'est pas suffisant pour dévitaliser les rhizomes. Ce résultat concorde avec les données disponibles sur le pourrissement des rhizomes obtenues dans le cadre des opérations d'élimination de la plante par la technique dite du "concassage-bâchage" (Boyer et Gerber 2013). En effet, il faut plus de dix-huit mois pour atteindre un taux de mortalité de 100% des rhizomes par pourrissement en milieu confiné sous bâche plastique. Ainsi, sans les retournements qui font passer le compost de l'extérieur du tas vers l'intérieur et vice-versa, des rhizomes pourraient survivre en surface du tas jusqu'à la fin du processus de compostage.

Aux vues des résultats obtenus, deux retournements permettent une homogénéisation suffisante du produit pour que cela conduise à la dévitalisation complète des rhizomes, puisqu'aucune repousse n'a été observée sur le tas après le second retournement, ainsi qu'après épandage complet du produit obtenu. Par ailleurs pour que le produit sorte de la plateforme de Chambéry métropole - Coeur des Bauges, il doit obligatoirement être déplacé deux fois et cela se produit lors des retournements. Il n'y a donc aucun risque que du compost soit distribué sans avoir été remanié au moins deux fois.

L'essai en conditions réelles met également en évidence les précautions à prendre dans l'interprétation des résultats obtenus en laboratoire. En effet, les essais effectués sur des petits fragments de rhizomes (Day et al. 2009, Xian et al. 2011) concluent que des températures de l'ordre de 55°C pendant trois jours consécutifs, peuvent les dévitaliser, alors qu'en conditions réelles de compostage sur la plateforme, il a fallu plusieurs semaines à des températures bien supérieures. Les températures dans les andains sont en effet hétérogènes et les rhizomes eux-mêmes peuvent être plus ou moins longs et lignifiés et donc plus ou moins résistants.

5.3. Dévitalisation des graines

L'essai a été réalisé avec une quantité importante de graines, 1,3 millions. Bien que ces graines aient intrinsèquement des taux de germination relativement faibles, probablement en raison d'une aneuploïdie due à des croisements entre les différents clones (voir paragraphe 4.3.1), une différence significative de la viabilité des graines ayant ou non été soumises au processus de compostage a été mise en évidence. En effet, aucun semis n'a été observé sur le produit épandu après huit mois et demi de compostage alors que sur les placettes témoins, 45 semis se sont développés (ensemencement de 6000 graines). Ces résultats permettent de conclure que le traitement, tel qu'il est effectué sur la plateforme de Chambéry métropole - Coeur des Bauges, ne présente pas de risque que des graines survivent dans le produit final.

Par ailleurs, les tests de germination menés sur des graines placées dans des sachets à la surface du tas ont permis de montrer qu'après dix semaines de compostage, des graines peuvent encore germer même si les températures à l'intérieur de l'andain ont dépassé 55°C pendant un mois. Il en va de même pour des graines passant cinq mois en surface du compost. Ces résultats confirment les observations faites par Grundy et al. (1998) sur la présence de points froids dans les andains se traduisant par la présence potentielle de graines viables malgré des temps d'expositions prolongés.

Comme pour les rhizomes, ce sont les retournements mécaniques, qui en homogénéisant le tas de compost, empêchent que les graines restent en surface du tas et survivent au compostage. Dans le cas de l'expérimentation sur la plateforme de Chambéry métropole - Coeur des Bauges, les deux retournements ont été suffisants pour aboutir à une dévitalisation complète des graines de renouées asiatiques au bout de huit mois de traitement.

D'autre part, ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte l'hétérogénéité du tas de compost pour évaluer les risques de dispersion des graines de renouées mais aussi de toute autre plante invasive ou adventice. En effet, les essais en laboratoire aboutissent à des durées minimales d'exposition dans des conditions optimales se traduisant par des températures constantes et homogènes. Or, ces conditions ne reflètent pas la réalité de l'andain, qui peut présenter des variabilités de températures avec des zones plus ou moins froides. Par exemple, bien qu'une étude ait indiqué qu'une température de 60°C pendant quatre jours consécutifs permettaient d'annihiler le pouvoir germinatif des graines de renouées (Vial 2014), cette durée est loin d'être suffisante pour empêcher les graines de survivre à la surface du tas de compost. En effet, dans la présente expérimentation, même si les températures mesurées à l'intérieur de l'andain dépassaient 60°C pendant deux mois consécutifs, les graines situées à la surface du tas n'étaient pas pour autant dévitalisées.

5.4. Dévitalisation des tiges

Après trois mois de compostage, à des températures moyennes de l'ordre de 70°C, les tiges introduites dans le compost (7 m³, soit 8000 tiges) étaient entièrement sèches. Aucune bouture de tiges observée n'a survécu à l'issue de cette période de traitement. La dessiccation des tiges est donc un processus beaucoup plus rapide que celui des rhizomes.

Ces résultats confirment les essais réalisés sur d'autres sites concluant sur la dévitalisation des tiges de renouées asiatiques au cours du processus de compostage (Dufrost 2008, Lebert 2010, Gilles 2012).

Néanmoins, l'expérimentation a permis de montrer qu'il était possible que des tiges bouturent à la surface de l'andain dans des zones restées plus froides et humides, bien que la température atteinte à l'intérieur du tas dépasse 70°C pendant plus d'un mois. Sur la base des retours d'expériences disponibles, ce phénomène n'avait jamais été signalé. Dans l'essai, la tige qui a bouturé n'a pas survécu plus d'une semaine. Ce phénomène est par conséquent relativement rare et éphémère, ce qui explique qu'il n'ait pas été constaté dans d'autres expérimentations.

Par ailleurs, les tiges étant intégrées pendant la période végétative, le compost produit traverse forcément la saison automnale puis hivernale. Pour que des tiges risquent de disséminer la plante via le compost, il faudrait que les boutures puissent suffisamment se développer pour produire des parties rhizomateuses survivant à la période hivernale. Or, le développement complet d'une plante n'est pas possible du fait des deux retournements comme on a pu le constater avec les rhizomes (voir paragraphe 5.2).

5.5. Risques de dissémination via les engins

Les résultats obtenus ont permis de démontrer que les tiges, les rhizomes et les graines de renouées asiatiques ne survivent pas au processus de compostage tel qu'il est mis en œuvre sur la plateforme de Chambéry métropole - Coeur des Bauges. Par contre, comme pour tout chantier manipulant des renouées asiatiques, il existe des risques de dissémination de ces plantes via le déplacement des engins ou des outils utilisés sur la plateforme mais qui peuvent être maîtrisés par des mesures préventives. L'objectif de l'essai n'était pas de caractériser ce risque mais celui-ci peut être appréhendé à partir de certains constats et observations.

Sur plateforme de Chambéry métropole - Coeur des Bauges, le produit suit un cheminement de son entrée sur le site vers sa sortie en fonction de son état d'avancement dans le procédé. Les végétaux non broyés sont stockés à l'entrée du site. Le stock de produit après broyage est positionné à proximité, à l'extrémité sud du site. Plus le produit est avancé dans le stade de compostage, plus il est déplacé vers le nord de la plateforme où il est ensuite criblé avant d'être commercialisé (Figure 60). Les stocks sont espacés et les andains clairement identifiés, ce qui évite le risque de mélanger des stocks qui conduirait à une contamination du produit fini.

Les végétaux et le compost sont manipulés à la chargeuse. Ainsi, lorsque celle-ci a travaillé avec du produit frais, le godet devrait être complètement vidé avant d'aller manipuler du compost fini ou à un stade de traitement plus avancé pour éviter de disperser des diaspores. Cette mesure ne présente néanmoins pas de contrainte particulière puisque les matériaux n'ont pas tendance à rester collés dans le godet, celui-ci est donc généralement vide après chaque manipulation (Figure 61).



Figure 60 : vue aérienne du site (juillet 2017 – Google Earth®)



Figure 61 : godet exempt de débris végétaux, une fois déchargé

Le broyeur à végétaux, utilisé au tout début du traitement, peut être une source de dispersion des diaspores. En effet, cet engin n'est pas exclusivement réservé au broyage des végétaux sur la plateforme. Il est régulièrement déplacé sur d'autres sites.

Le broyeur est actuellement obligatoirement nettoyé à la soufflette à air comprimé avant de quitter le site. Mais, l'outil comporte une zone inaccessible entre le rouleau ameneur et les couteaux qui ne peut être nettoyée aisément (voir Figure 62). Des fragments végétaux restent ainsi coincés dans cette partie de l'engin ainsi que sous le tapis d'entraînement. Le volume de végétaux pouvant rester coincé dans le broyeur est estimé à une centaine de litres.

Actuellement, le prestataire, opérant sur la plateforme de Chambéry métropole - Coeur des Bauges, ne réalise du broyage qu'à destination des plateformes de compostage ou pour la production de bois énergie. Le risque de dissémination de la plante est donc nul puisque les diaspores éventuelles seraient compostées ou brûlées dans ces exploitations. Même en faisant l'hypothèse de durées de compostage plus courtes ou de retournements moins fréquents sur d'autres plateformes, la probabilité qu'une diaspore soit dispersée, puis justement placée dans des conditions lui permettant de survivre est nulle.

Au cas, où le broyeur serait utilisé en sortant de la plateforme pour du broyage en milieu naturel ou pour la production de paillis destiné aux espaces verts, le risque de dissémination est par contre possible même s'il est très réduit du fait du très faible volume de produits végétaux pouvant être stocké dans le broyeur.

Par mesure de précautions, les opérations de broyages pourraient donc toujours être terminées avec des stocks exempts de renouées pour diminuer la probabilité qu'un fragment de cette plante reste coincé dans le broyeur. Toutefois, il n'est pas possible d'affirmer que cette mesure sera suffisante pour éliminer complètement le risque quand le broyeur est utilisé dans une production avec un risque de dissémination (broyages en espaces naturels, production de paillis). Si ce protocole était mis en œuvre, des essais seraient à conduire sur le broyeur pour étudier comment se renouvelle le petit stock de débris végétaux, qui restent coincés dans l'appareil après le nettoyage.

Par ailleurs, le protocole de nettoyage du broyeur pourrait être adapté pour limiter le risque de dispersion des diaspores via cette opération. Ce nettoyage, réalisé à la soufflette à air comprimé, devrait toujours être effectué sur la plateforme de compostage et en aucun cas en dehors. De plus, cette opération sera réalisée sur une surface imperméabilisée, la plus éloignée possible des stocks de produit fini et si possible directement sur la zone dédiée au broyage. Les débris végétaux tombés au sol seront ainsi repris et placés sur le stock de végétaux broyés.

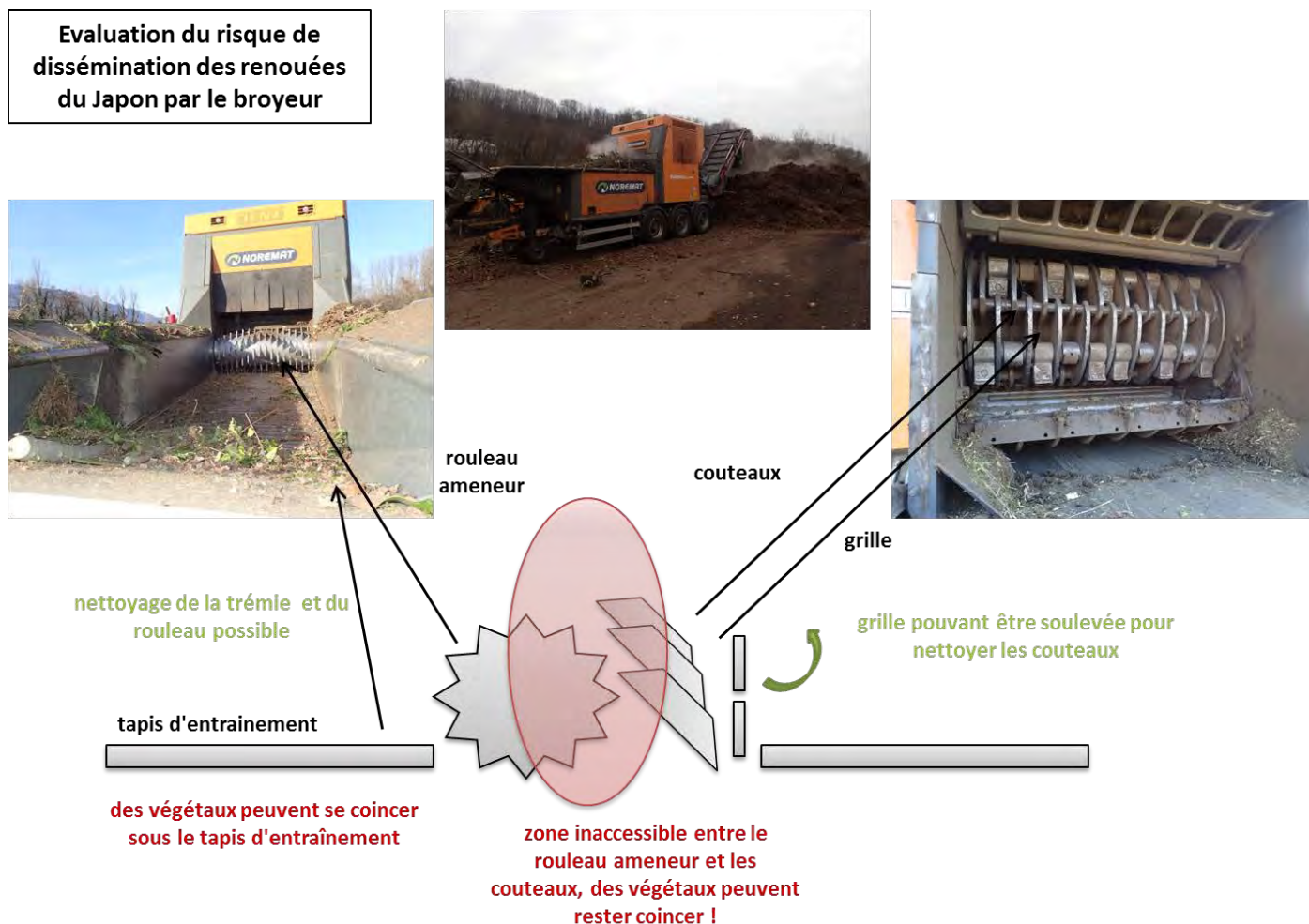


Figure 62 : risque de dispersion des diaspores via le broyeur à végétaux

Les outils utilisés pour le criblage en fin de processus ne risquent pas de disséminer des renouées du Japon, puisque les diaspores sont entièrement dévitalisées à cette étape du procédé.

5.6. Transposition à d'autres sites de compostage

5.6.1. Evaluation du risque de survie des diaspores

L'expérimentation a permis de démontrer que tous les types de produits issus de la gestion des renouées asiatiques (tiges, rhizomes et graines) pouvaient être acceptés sur la plateforme de compostage de Chambéry-Le-Vieux sans risque de survie des diaspores. Les conditions sur la plateforme de Chambéry métropole - Coeur des Bauges fixent par conséquent les conditions qui ont conduit à dévitaliser tous les types de diaspores potentiels et qui peuvent être retenues pour évaluer le risque sur d'autres sites produisant du compost.

Ces conditions sont les suivantes :

- au moins huit mois de traitement ;
- deux retournements mécaniques réalisés à un tiers et deux tiers de la durée du traitement, consistant à déplacer les matériaux de l'extérieur du tas vers l'intérieur et vice-versa ;
- des montées en température conséquentes et constantes à l'intérieur de l'andain : de l'ordre de 70°C pendant le premier mois de traitement, obtenues grâce à une aération du tas assurée par une ventilation forcée fonctionnant pendant six semaines, puis des températures supérieures à 55°C après chaque retournement pendant plusieurs jours consécutifs.

Par contre, pour des plateformes de compostage industriel fonctionnant avec des durées plus courtes de compostage (inférieures à huit mois) ou des températures moins élevées (< 70°C), le risque peut exister et des études spécifiques complémentaires seraient nécessaires pour lever ce doute. Il est possible par exemple que sur des plateformes travaillant sans ventilation forcée mais avec des retournements plus nombreux et plus fréquents, conduisant à une meilleure homogénéisation du compost, la dévitalisation des graines et des propagules de renouées au cours du processus de compostage soit tout aussi efficace voir même plus rapide.

L'essai a permis de démontrer que les conditions minimales imposées par l'arrêté du 22 avril 2008⁵ fixant les règles que doivent suivre les installations de compostage soumises à autorisation, ne sont pas suffisantes pour dévitaliser les diaspores introduites dans un compost. En effet, des repousses issues de fragments de rhizomes ont été observées sur le tas après le premier retournement mécanique. Or, les températures mesurées dans le tas de compost étaient largement supérieures à 55°C pendant des durées bien plus longues que trois jours consécutifs avant le premier retournement. De même, à l'issue de ce premier retournement, les températures mesurées dans le tas de compost ont nettement dépassée 50°C pendant 24 h. Le respect de la réglementation ne permet donc pas de garantir l'absence de risque de dissémination de la plante.

⁵ deux semaines de ventilation forcée au cours desquelles la température doit dépasser 55°C pendant trois jours consécutifs et un retournement à l'issue duquel la température doit être supérieure à 50°C pendant 24 h

De plus, compte-tenu des résultats obtenus, il est déjà possible d'affirmer que des procédés mettant en œuvre un seul retournement présentent un risque de dispersion des diaspores. C'est notamment le cas sur la plateforme de compostage géré par la société AXIA-PUGET située à Francin (73), travaillant avec une ventilation forcée. Le procédé de traitement des végétaux dure huit à douze semaines et un seul retournement mécanique est réalisé⁶. Ce type de traitement n'est pas suffisant pour empêcher les rhizomes et probablement les graines de survivre au compostage. Ainsi, pour ce site, l'interdiction d'apporter des renouées du Japon doit restée inscrite au cahier des charges.

La figure suivante synthétise, sur la base des résultats obtenus, l'évaluation du risque de survie de la plante pour différentes modalités de traitement :

	insuffisant	peut-être	suffisant
durée totale du traitement	3 mois	6 mois	8 mois
homogénéisation	1 retournement		2 retournements
température	55°C pendant 3 j	55-70°C pendant plusieurs semaines	70°C pendant 2 mois, puis supérieur à 55°C pendant plusieurs jours consécutifs après chaque retournement
	des diaspores peuvent survivre	risque non déterminé	les diaspores sont dévitalisées

Figure 63 : évaluation du risque de survie de la plante en fonction des conditions de compostage

5.6.2. Evaluation du risque de dispersion par les engins

Après s'être assuré que les conditions dans lesquelles le processus de compostage est réalisé permettent de dévitaliser entièrement les propagules et les graines, il est nécessaire d'évaluer le risque de dispersion de ces diaspores par le déplacement des engins et des outils utilisés.

Pour limiter le risque de dispersion de la plante sur la plateforme, le gestionnaire inventorie l'ensemble des opérations réalisées et les engins utilisés puis évalue ce risque et propose des mesures permettant de le réduire. Pour évaluer le risque de dissémination de la plante via, le procédé, l'arbre de décisions suivant peut être utilisé.

⁶ Source : entretien téléphonique avec un représentant de la société TRIGENIUM le 21 novembre 2017.

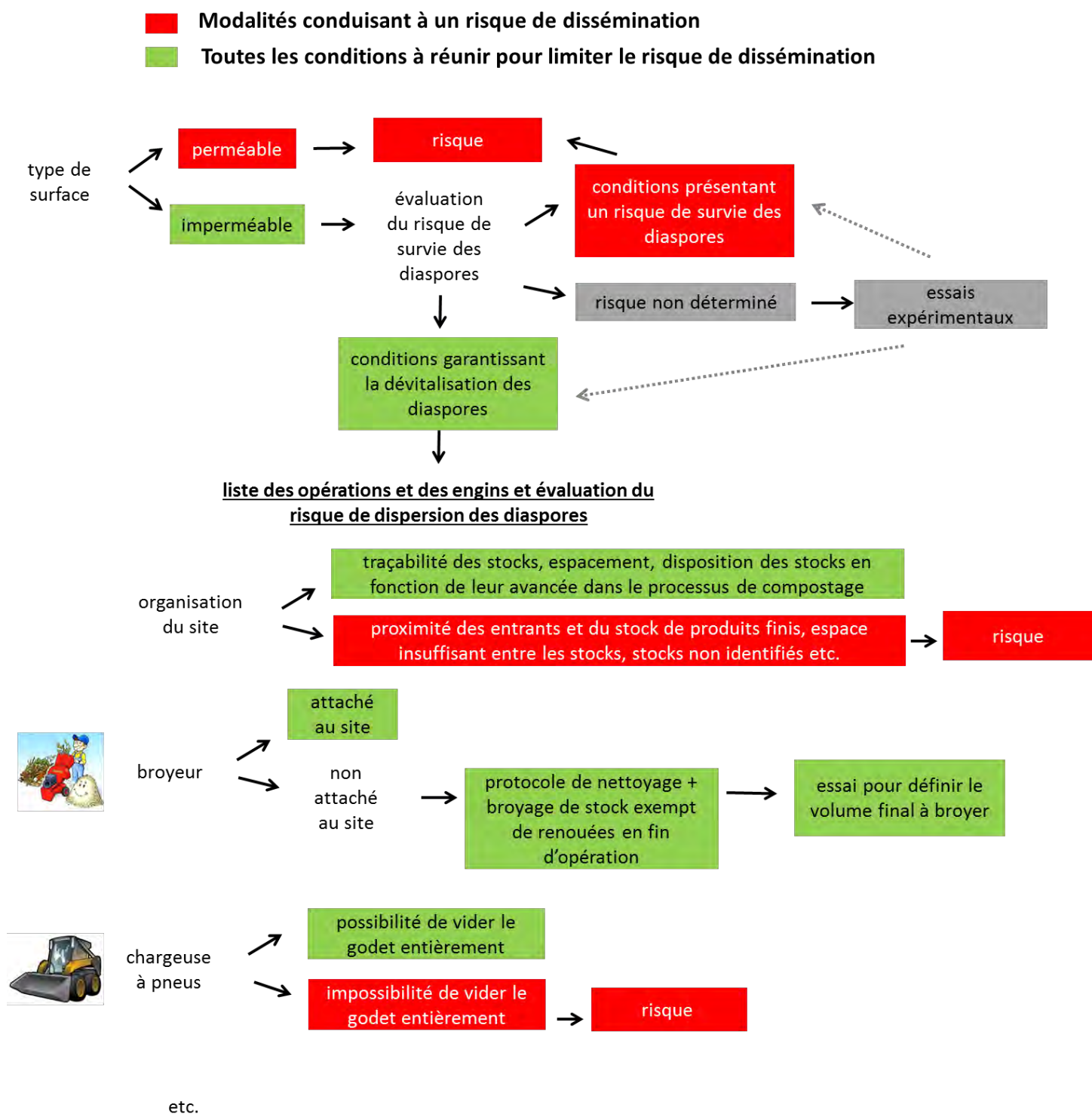


Figure 64 : Arbre décisionnel pour l'évaluation des risques de dissémination des renouées asiatiques via la filière de compostage

Quelque soit le procédé utilisé, il est impératif que toute surface en contact avec des diaspores de renouées asiatiques, ou du compost pouvant contenir ces diaspores, soit imperméable. En effet, si la surface n'est pas imperméabilisée, des rhizomes, tiges ou graines peuvent ne pas être repris par les engins et germer ou bouturer sur le sol conduisant à un envahissement sur la plateforme. Le risque de dissémination de la plante ne pourra alors plus être maîtrisé.

La première source potentielle de dispersion est le broyeur à végétaux. En effet, des fragments de tiges et de rhizomes ou des graines peuvent rester coincer dans l'outil et cela peut être à l'origine du développement de renouées asiatiques sur un autre site. Des mesures simples et préventives peuvent être mises en place comme le passage dans le broyeur d'un certain volume de produits exempts de renouées pour terminer l'opération de broyage et le nettoyage sur place de l'outil. Le volume à broyer, pour être sûr qu'il n'y a plus de risque de transport de fragments de renouées, est à déterminer par des essais. En effet, il n'a pas été étudié sur la plateforme de Chambéry métropole - Coeur des Bauges et il dépend probablement des outils utilisés. Le seul constat qui a pu être fait sur la plateforme, est que des débris végétaux peuvent être transportés d'un site à l'autre via le broyeur malgré le nettoyage, mais que cela ne pose pas de problème, le broyeur n'étant dédié qu'à des opérations dans la filière de compostage ou de bois énergie.

De plus le risque de dispersion peut être réduit en limitant bien la zone de broyage, en l'espaçant des andains de compost, en l'éloignant le plus possible du produit fini et en effectuant l'opération de nettoyage sur cette zone de broyage afin de ramasser les débris végétaux et en compostant ceux-ci.

La seconde source potentielle importante de dispersion des diaspores est la manipulation du produit par les engins, du type chargeuse, et les risques de mélange des stocks. Pour palier à ce risque, les stocks de compost doivent être clairement identifiés et espacés les uns des autres pour permettre le passage des engins. Les stocks doivent être agencés en fonction de leur stade de compostage et les allées doivent être dépourvues de débris végétaux. De plus, il faut s'assurer que les outils utilisés pour déplacer les stocks ne sont pas susceptibles d'intégrer des produits frais dans du compost à un stade de traitement plus avancé : godet complètement vidé, pas d'engins à chenille pour faire ces opérations...

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'essai a permis de démontrer que le procédé, tel qu'il est réalisé sur la plateforme de compostage industriel de déchets verts de Chambéry-Le-Vieux, est effectué dans des conditions conduisant à la dévitalisation complète des tiges, rhizomes et graines de renouées asiatiques. De plus, l'organisation actuelle du site limite le risque de dissémination via le déplacement des engins et des outils utilisés sur le site si quelques précautions spécifiques sont prises pour l'opération de broyage et le nettoyage du broyeur.

Par ailleurs, l'expérimentation a permis de démontrer que les conditions minimales imposées par l'arrêté du 22 avril 2008 fixant les règles que doivent suivre les installations de compostage soumises à autorisation⁷, sont très insuffisantes pour dévitaliser les rhizomes, les graines voir même les tiges. En effet, les types de processus mis en jeu et les vitesses sont très hétérogènes dans un andain. Les diaspores peuvent donc survivre dans des zones restées plus froides, comme à la surface du tas. Le respect de la réglementation ne garantit pas l'absence de risque de dissémination des renouées asiatiques et une évaluation de ce risque doit être faite pour chaque type de process en s'appuyant sur les résultats obtenus sur la plateforme de Chambéry métropole - Coeur des Bauges.

D'autre part, l'hypothèse d'une dessiccation des rhizomes a été émise pour expliquer leur dévitalisation au cours du compostage. Néanmoins, l'effet de la perte en eau sur les capacités de régénération des rhizomes et la vitesse de ce processus n'ont jamais été étudiés. L'effet de la dessiccation mérite d'être exploré puisqu'il joue non seulement un rôle clé dans la dévitalisation rapide des rhizomes au cours du compostage, mais aussi dans certains procédés développés pour éliminer les renouées du Japon dans des sols envahis. C'est le cas par exemple pour la technique dite de "neutralisation immédiate par criblage-concassage" développée par la CNR (Moiroud 2017). En effet, cette technique consiste après retrait des matériaux fins, à concasser très finement les rhizomes, ce qui provoque leur mortalité immédiate. Ce n'est pas la fragmentation des rhizomes qui provoque celle-ci, puisqu'il est bien connu qu'un très petit fragment de rhizome est capable de régénérer la plante entière. Mais on peut faire l'hypothèse que c'est leur séchage au cours du traitement qui est à l'origine de cette dévitalisation. L'élimination des matériaux les plus fins, qui pourraient contenir de l'eau, puis le concassage très fin des matériaux grossiers provoquent en effet des élévations spontanées et conséquentes de températures dans la chambre de concassage (com.pers. Moiroud), qui pourraient être à l'origine d'une perte en eau importante et suffisante des rhizomes pour les dévitaliser.

L'étude des capacités de fragments de rhizomes à résister à la perte en eau des tissus serait très utile pour fixer les conditions précises de dévitalisation des rhizomes dans les différentes filières de compostage. Cela permettrait également de définir des indicateurs assez simples basés sur la teneur en eau pour suivre la mortalité des rhizomes au cours de certains processus.

oOo

⁷ deux semaines de ventilation forcée au cours desquelles la température doit dépasser 55°C pendant trois jours consécutifs et un retournement à l'issue duquel la température doit être supérieure à 50°C pendant 24 h

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bader, N. 2017. Measuring decomposition with litterbags. Whitman College Geology Department. <http://nickbader.whitman.edu/research/protocols/litterbag>
- Bailey, J. and R. Wisskirchen. 2006. The distribution and origins of *Fallopia x bohemica*. Nordic Journal of Botany **24**(2).
- Boyer, M. and E. Gerber. 2013. Expérimentations d'une méthode de gestion mécanisée des renouées exotiques envahissantes (*Fallopia* sp) en France, Suisse et Allemagne. GT-IBMA
- Crosaz, Y. 2008. Premiers essais pour la détermination du potentiel germinatif de la Renouée de Bohême. Quatrième Rencontre Botanique Régionale de Rhône-Alpes, 4 et 5 octobre 2008, Meylan. <http://www.geophyte.fr/>
- Daugovish, O., J. Downer, B. Faber, and M. McGiffen. 2007. Weed survival in yard waste mulch. Weed Technology **21**:59-65.
- Day, L., J. Rall, S. McIntyre, and C. Terrance. 2009. Japanese knotweed composting feasibility study, Delaware County (New York). Ecological Restoration **27**:377-379.
- Dufrost, T. 2008. Étude de la gestion des déchets de Renouées sur le département de la Loire. CPIE des Monts du Pilats.
- Ecole Supérieure d'Agriculture Angers Loire. 2017. Le LEVA-bagMD. <http://www.groupe-esa.com/wp-content/uploads/2017/09/fiche-indicateur-levabag.pdf>
- Eghball, B. and G. W. Lesoing. 2000. Viability of weed seeds following manure windrow composting. Compost Science & Utilization **8**:46-53.
- Engler, J., K. Abt, and C. Buhk. 2011. Seed characteristics and germination limitations in the highly invasive *Fallopia japonica* s.l. (Polygonaceae). Ecological research **26**:555-562.
- Forman, J. and R. V. Kesseli. 2003. Sexual reproduction in the invasive species *Fallopia japonica* (Polygonaceae). Am J Bot **90**:586-592.
- Gerber, E. 2013. Test de compostage des renouées exotiques.
- Gerber, E., C. Murrell, C. Krebs, J. Bilat, and U. Schaffner. 2010. Evaluating non-chemical management methods against invasive exotic knotweeds, *Fallopia* spp. CABI Final Report February 2010:17 pp.
- Gilles, C. 2012. Expérimentation de compostage de renouées géantes. FRAPNA, Colloque national sur les renouées asiatiques
- Grundy, A., J. Green, and M. Lennartsson. 1998. The effect of temperature on the viability of weed seeds in compost. Compost Science & Utilization **6**:26-33.

- GT IBMA. 2016. Reynoutria x bohemica. Base d'information sur les invasions biologiques en milieux aquatiques. Groupe de travail national Invasions biologiques en milieux aquatiques. . UICN France et Onema
- HAURY, J. 2005. Fiche sur le compostage des végétaux aquatiques et palustres UMR INRA Agrocampus EQHC/DIREN des Pays de la Loire.
- Larney, F. J. and R. E. Blackshaw. 2003. Weed seed viability in composted beef cattle feedlot manure. *Journal of Environmental Quality* **32**:1105-1113.
- Lavoie, C. 2017. Gestion des résidus végétaux et des sols contaminés avec des plantes envahissantes. Université de Laval.
- Le Guen, M., M. Bozec, and J. Haury. 2009. Les renouées asiatiques invasives en Côtes d'Armor : éléments sur la gestion et les modes de dissémination. *in* ECOVEG and C. G. C. d'Armor, editors. Colloque national renouées asiatiques, Technopôle Saint Etienne, <http://www.colloque-renouee.com/2012/res/GemblouxRenoueesAvril2009Def-2.pdf>
- Lebert, D. 2010. Lutte contre les invasives - test de compostage. Esat Ferme de Chosal.
- Lerch, M. 2015. ZAC Carreau Marie-Louise - la renouée en chantier - éradication expérimentale et compostage. AGRIVALOR
- Moiroud, C. 2017. Traitement des matériaux contaminés par des rhizomes de renouées du Japon. Association Rivières Rhone-Alpes Auvergne, Journée technique d'information et d'échanges
- Rempel, S. 2011. Composting of invasive plant species. Metro Vancouver.
- Sarat, E., E. Mazaubert, A. Dutartre, N. Poulet, and Y. Soubeyran. 2015. Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques - Connaissances pratiques et expériences de gestion. Office national de l'eau et des milieux aquatiques.
- Tompkins, D. K., D. Chaw, and A. T. Abiola. 1998. Effect of windrow composting on weed seed germination and viability. *Compost Science & Utilization* **6**:30-34.
- Vial, D. 2014. Plan régional de valorisation des déchets issus des chantiers de gestion de plantes invasives Conservatoire d'Espaces Naturels Centre.
- Xian, C., P. Bardos, and S. Robinson. 2011. Can composting kill Japanese knotweed. Organic recycling, University of Reading