



Analyse techno-économique des procédés de compostage végétal en vue d'une valorisation agronomique des déchets verts

Gildas Baron

► To cite this version:

Gildas Baron. Analyse techno-économique des procédés de compostage végétal en vue d'une valorisation agronomique des déchets verts. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02361198

HAL Id: dumas-02361198

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02361198>

Submitted on 13 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Année universitaire : 2018-2019
Spécialité : Ingénieur Agronome
Spécialisation (et option éventuelle) :
Agroecology

Mémoire de fin d'études

- ☒ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- ☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- ☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Analyse techno-économique des procédés de compostage végétal en vue d'une valorisation agronomique des déchets verts

Par : Gildas BARON



Soutenu à Rennes le 10/09/2019

Devant le jury composé de :

Présidente : Guenola Peres

Maître de stage : Eléonor Germain

Enseignant référent : Alain Carpentier

Examinatrice : Anne Jaffrezic

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»

disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Remerciements

Ce stage a constitué une expérience enrichissante à bien des égards, humainement comme professionnellement. De nombreuses personnes ont participé, de près ou de loin à cette mission, et ces lignes ne suffiront pas à exprimer pleinement la gratitude qui est la mienne.

Il s'agit avant tout de la fin de mon parcours étudiant, et les premiers que je me dois de citer ici sont mes parents et mes frères, qui m'ont soutenu depuis mon plus jeune âge, et qui ont dû me supporter, ce qui était loin d'être facile par moment. Sans cette famille et mon enfance au cœur d'une ferme en Agriculture Biologique, je n'aurais jamais eu le parcours qui a été le mien, ce parcours qui s'achève aujourd'hui par un diplôme d'ingénieur agronome.

Il y a tout un tas de gens qui consciemment ou pas ont joué un rôle déterminant dans mon parcours avant mon intégration à Agrocampus Ouest, des profs, des techniciens, des agriculteurs, des encadrants, des camarades de classe, j'ai une pensée émue pour tous ces gens.

J'éprouve une grande gratitude à l'égard de Hussein Al-Mohammad, d'Edith Le Cadre, de Safya Menasseri et bien sûr de Guenola Péres pour le rôle primordial qu'ils remplissent pour la toute jeune spécialisation *Agroecology* que je ne regrette définitivement pas d'avoir suivi. Un grand merci à Alain Carpentier pour ses conseils et sa sympathie. Une pensée particulière pour Olivier Godinot, qui m'a parlé de cette spécialisation dès les portes ouvertes 2016. Je me rappelle bien la conversation intéressante que nous avons eu ce jour-là, d'autres ont suivi. C'est l'ensemble des équipes pédagogiques et techniques que je remercie pour ces belles années.

Mais ceux que je remercie avec une émotion toute particulière, teintée de nostalgie, c'est l'ensemble des personnes que j'ai côtoyées durant ces six mois. Ma reconnaissance est grande envers l'entreprise qui a achevé ma formation. L'ambiance qui y règne est agréable dans tous les services, j'ai reçu et offert un grand nombre de sourires dans une ambiance cordiale où il faisait bon travailler. Cette découverte du monde d'une grande entreprise privée était très enrichissante.

Un immense merci à Jacques Fuchs, de la FiBL, grand expert en compost, pour sa sympathie, sa disponibilité ses précieux conseils et pour la bonne personne qu'il est.

Bien évidemment mes remerciements sont tout particulièrement destinés au personnel de l'Herbier. Cécile tout d'abord, chef d'orchestre de cette fourmilière avec qui échanger m'a toujours été agréable et instructif. Merci à Thierry, les éclats de rire du « vieux barbu » ont rythmé cette expérience et les échanges lors des repas ou des marches vers le parking ont toujours été un plaisir. Merci à Ophélie pour tes précieux conseils, tes digressions et tes cookies délicieux ! Merci à Britta, aux deux Isa, à Theodorien, Barbara, Anne-Constance, Manu, Thibault, Perrine, Louise, Celia, Valéry, Céline et bien d'autres, pour les conversations et les grandes tranches de rire dans la salle de pause. Merci à Bertrand pour ta bonne humeur permanente et de m'avoir fait re-baptisé M. Compost auprès de l'ensemble de l'Herbier ! Merci à Daniel, Joël, Didier Fredo et Roger pour les échanges toujours pertinents et agréables que l'on a eu.

Et bien évidemment le plus grand des mercis à la meilleure des encadrantes possibles, celle sans qui rien n'aurait été possible, celle à qui j'ai osé laisser des messages sans réponses, la reine des fourneaux, le dynamisme et la sympathie incarnés, Eléonor, je ne te remercierai jamais assez pour ces six mois plus que formateurs !

Table des matières

Introduction.....	1
I. Les composts, éléments incontournables de l'agriculture de demain.....	3
1. Un processus de mieux en mieux connu et maîtrisé.....	3
2. Un intrant au service de l'agroécologie.....	6
3. Un développement récent, qui s'accélère	8
II. Etat initial.....	9
1. Présentation globale : un recyclage peu maîtrisé.....	9
2. Propriétés techniques du produit.....	10
3. Une question non optionnelle	12
III. Analyse des axes d'amélioration.....	13
1. Expérimentation.....	13
2. Résultats et discussion.....	16
3. Discussions.....	20
4. Une hausse qualitative et quantitative des entrants.....	20
IV. Quelles évolutions ?.....	21
1. Les évolutions non-optionnelles	21
2. Des choix à faire	22
Conclusion.....	25
Références.....	26
Table des Annexes	27

Liste des abréviations :

PPAM : Plantes à Parfum, Aromatiques et Médicinales

MO : Matière organique

O₂ : dioxygène

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

CO₂ : dioxyde de carbone

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

MS : Matière Sèche

FiBL : *Forschungsinstitut für biologischen Landbau* : Institut de recherche pour l'Agriculture Biologique en Allemagne, Autriche et Suisse

CUMA : Coopérative d'Utilisation du Matériel Agricole

Table des illustrations

Figure 1 : Courbe théorique de l'évolution de la température en compostage et phases associées..	4
Figure 2 : Deux exemples de retourneurs d'andain.....	5
Figure 3 : Schéma des chemins d'air dans un andain ventilé	5
Figure 4 : Le test du poing pour mesurer l'humidité sans matériel.....	6
Figure 5 : représentation schématisée d'une stratégie où la résilience est un objectif principal.....	7
Figure 6 : Illustration, des résultats d'une multi-analyse d'études sur les composts et maladies.....	7
Figure 7 : Evolution du nombre de station de compostage en France de 1968 à 2005.....	8
Figure 8 : Plan de la station et de son fonctionnement avant le stage.....	9
Figure 9 : Photographie des plaques de faux semis.....	10
Figure 10 : Représentation de l'évolution du nombre d'adventices levées.....	10
Figure 11 : Schéma du dispositif expérimental.....	13
Figure 12 : Représentation des évolutions de température des andains expérimentaux.....	15
Figure 13 : Modèle de l'effet des conditions de compostage sur le nombre de jours où $\theta > 60^{\circ}\text{C}$...	16
Figure 14 : Photographie des plaques de faux semis des andains expérimentaux.....	17
Figure 15 : Boîtes de dispersion des adventices et de la germination du test cresson	17
Figure 16 : Modèle de la levée d'adventice expliquée par la taille de l'andain.....	17
Figure 17 : Modèle du taux de levée au test cresson expliqués par le nombre de jours au-dessus des valeurs seuils de 60°C et 65°C	18
Figure 18 : Boîtes de dispersion des résultats de test cresson par date de début.....	18
Figure 19 : Comparaison des compositions chimiques des échantillons.....	19
Figure 20 : Représentation des profils chimiques des échantillons.....	19
Figure 21 : Exemple de cribreuse à compost végétal.....	21
Figure 22 : vue satellite de la ferme de La Marandais, futur site de compostage.....	22
Figure 23 : Broyeur forestier suggéré pour investissement.....	23
Figure 24 : Retour d'andain suggéré pour investissement.....	24
Figure 25 : Illustration représentant le fonctionnement d'une station en ventilation forcée.....	24

Table des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique de plusieurs matériaux compostables.....	3
Tableau 2 : Rapport C/N de plusieurs matériaux organiques.....	3
Tableau 3 : Compositions chimiques de trois types de compost utilisés en Suisse.....	6
Tableau 4 : Récapitulatif du nombre de jours de dépassements des températures seuils par andain...	16
Tableaux 5 à 8 : Estimations des coûts annuels de diverses propositions d'évolution.....	22 à 24

Introduction

La mission prend place à La Gacilly (56), siège historique de l'entreprise Yves Rocher, créateur de la cosmétique végétale®. La principale usine de production des produits Yves Rocher est située sur cette commune rurale qui compte en son sein deux milliers d'habitants. C'est ici que se trouve aujourd'hui le siège social, des usines de fabrications ainsi que la plateforme de distribution d'où partent les livraisons de produits à destination du monde entier. C'est également ici que se situent les services Agronomie et Botanique, au sein desquels se déroule cette mission de stage. Le jardin botanique et la production de matières premières agricoles sont peu connus pour la marque cosmétique, mais l'expertise acquise en la matière est actée par les spécialistes.

Créé en 1977, le jardin botanique présentait à l'origine les plantes entrant dans la composition des produits cosmétiques de la marque. Il s'est étoffé et agrandi depuis lors, et compte aujourd'hui plus de 1000 espèces végétales utiles à l'homme harmonieusement agencées, en accès libre pour le public. Si les plantes à parfum, cosmétiques et médicinales sont mises à l'honneur, on y trouve aussi des plantes alimentaires et tinctoriales, ainsi que des plantes présentant un intérêt écologique important. En plus d'être considéré aujourd'hui comme un conservatoire ethnobotanique et un observatoire du vivant via ce jardin, Yves Rocher se démarque dans sa gestion des matières premières végétales incorporées aux produits de la marque. L'entreprise a ainsi développé une stratégie de sourcing basée sur des filières végétales durables et équitables d'approvisionnement en plantes de différents pays. A La Gacilly, on trouve la filière *origine*, où sont produites depuis 1979 les plantes adaptées au contexte climatique breton, destinées à la production des cosmétiques. En 1997, le service agronomie entame sa conversion vers l'agriculture biologique, à une époque où ce terme est méconnu du grand public et ce mode de production marginal. Aujourd'hui, on dénombre plus de 60 hectares consacrés à la production de 8 plantes sur la commune de La Gacilly : arnica, camomille, calendula, edulis, mauve, ficoïde, bleuet et matricaire. Le service poursuit un objectif permanent d'amélioration et d'adaptation, confronté aux besoins de renouvellement de l'éventail des productions en accord avec les besoins industriels qui évoluent dans le temps. Ce contexte de production coexiste en permanence avec des expérimentations pour répondre à divers objectifs dont voici une liste non-exhaustive : développer l'agroécologie, améliorer la qualité des terres et la biodiversité que l'on y trouve. Mais aussi produire des connaissances scientifiques sur des espèces d'intérêt peu cultivées, encore moins en Agriculture Biologique ou encore trouver les futures plantes cosmétiques cultivables à La Gacilly présentant un intérêt industriel. La préservation d'un environnement sain étant une valeur fondamentale pour l'entreprise, l'ensemble des terres et des sites industriels du groupe Rocher sont gérés en répondant aux critères de *Refuges* de la LPO (Ligue pour la Protection des Oiseaux) et comprennent donc de nombreux espaces boisés.

L'entretien des 2 hectares du jardin botanique et des 60 hectares de production et d'expérimentation de PPAM (Plantes à Parfum, Aromatiques et Médicinales) génère une production relativement importante de déchets verts à valoriser. Le Groupe Rocher gère également un éco-hôtel sur la commune (*La Grée des Landes*) ainsi que la propriété de *La Forêt Neuve*, autour desquels le groupe a une activité d'exploitation forestière et agricole, générant d'autres matières végétales à recycler. La mise en place prochaine d'une installation industrielle de distillation destinée à la production d'hydrolats sur le site va entraîner une hausse des quantités de déchets organiques à traiter. A cela s'ajoute le dépassement du seuil réglementaire de 10t de biodéchets/an sur le restaurant d'entreprise qui doit être résolu. Ce dépassement imposant une valorisation de ces déchets.

Or, les effectifs étant déjà grandement mobilisés par leurs missions de production, d'expérimentation et d'entretien des espaces, le recyclage des déchets verts n'est actuellement pas maîtrisé et se révèle être optimisable.

La première étape de la mission est de faire un état des lieux précis de la situation existante en termes de gestion et de valorisation de ces déchets, pour ensuite analyser les différents axes d'amélioration. Cela passe par une quantification des différentes matières organiques recyclables actuelles et futures, une budgétisation du fonctionnement actuel, et un regard sur la qualité du produit en fin de décomposition. Différentes possibilités d'amélioration ont été étudiées, via des tests expérimentaux et des analyses de faisabilité. Il s'agit finalement de proposer différentes alternatives aux procédés actuels en chiffrant et en précisant les différents avantages et inconvénients des solutions proposées.

Lorsqu'une action est évoquée sans que la personne l'ayant réalisé ne soit citée, cela implique que c'est l'auteur de ce rapport qui s'en est occupé.

Tableau 1 : Composition chimique de plusieurs types d'intrants compostables. Chemical composition of different types of compostable products (Van der Wurff et al., 2016)

Feedstock	DM	OM	C/N	N/P	Ntot	P	K	Ca	Mg
wheat straw	92.4	95.1	117	7.6	4.5	0.6	2.6	2.9	0.7
grass hay	63.5	92.4	51	5.1	10.0	2.0	17.6	4	1.2
poplar bark	46.5	90.3	58	7.1	8.8	1.3	6.6	26.6	1.7
willow wood chips	46.9	96.7	85	6.8	6.4	0.9	2.8	7.5	0.6
chicken manure	62.7	42.8	8.3	1.9	29.0	15.5	21.7	73.9	4.9
grass clippings	8.9	88.2	24	4.9	20.3	4.1	35.4	4.8	1.7

Values are averages of 4 samples per feedstock. OM organic matter, DM dry matter, Ntot total nitrogen. DM is given in % of the fresh product, OM in % of DM. Nutrient concentrations are given in g/kg DM.

Tableau 2 : Rapports C/N de plusieurs matériaux organiques. C/N ratio of different organic materials. (Van der Wurff et al., 2016)

Organic material	C/N	Organic material	C/N
Urine	0.8	Kitchen organic waste	15-25
Feathers	4-5	Ideal C:N of starting mixture	30-35
Pig bristles	5	Rumen*	25-30
Chicken manure	8-10	Garden waste	20-35
Food waste	14-17	Coffee grounds	20-30
Grass clippings	9-25	Fruit waste	25-40
Hay	15-25	Nut shells	35
Mature compost	12-15	Tree leaves	40-70
Young compost	15-18	Straw	50-100
Cow manure	15-20	Wood (sawdust)	200-500

*the rumen content of slaughtered cattle

I. Les composts, éléments incontournables de l'agriculture de demain

1. Un processus de mieux en mieux connu et maîtrisé

Le compostage est un processus de recyclage de matière organique (MO) en conditions aérobies réalisé par l'Homme, à la différence de l'humification, qui est également une dégradation de MO, mais réalisée en conditions naturelles sans intervention humaine. Si le compostage est réalisé depuis des siècles, cela ne fait qu'un peu plus de cent ans qu'il a été prouvé que cette décomposition résulte d'activités biologiques. Depuis lors, les progrès techniques et scientifiques ont permis une amélioration considérable des connaissances relatives aux procédés de compostage (Rawat, Narain Johri, 2013).

Cette dégradation étant le fruit d'organismes vivants, elle est régie par les conditions physico-chimiques du milieu. Les organismes vivants hétérotrophes aérobies ont besoin d'eau, d'oxygène, de nourriture, le tout dans des conditions de pression/température acceptables pour permettre leur bon fonctionnement métabolique. Les nutriments dont ils ont besoin sont les déchets organiques à composter, les autres variables sont donc celles dont dépend la bonne optimisation d'un processus de compostage.

1. Mélange initial

Le mélange de départ joue un rôle essentiel pour la production d'un compost de qualité. En effet il s'agit de la source d'énergie et de nutriments du futur compost, mais aussi de la source de la plupart des microorganismes. Comme l'indique le tableau 1, la composition chimique varie grandement d'un intrant à un autre. De cette composition chimique initiale dépend l'activité biologique permettant le compostage, et la composition chimique finale du produit.

Il est primordial que ce mélange ne contienne pas de polluants et matériaux indésirables non biodégradables comme les plastiques par exemple, mais aussi la céramique, le verre ou les métaux. Le risque est double : non seulement cela peut entraîner l'épandage de matériaux totalement indésirable dans les champs ou les serres, mais en plus, la dégradation partielle de certains produits peut inhiber la vie microbienne et donc le processus de compostage. De même, les restes alimentaires de produits cuisinés sont déconseillés, sauf en petite quantité. En effet, ceux-ci attirent la faune sauvage qui peut saccager les andains (dépôts longitudinaux de MO). De plus, leurs teneurs en sel nuisent au bon déroulement du processus de compostage.

Chimiquement, une large gamme de mélanges initiaux permettent la réalisation d'un bon produit final, mais un bon équilibre de rapport C/N est compris entre 25 et 35 (tableau 2). La structure physique de ce mélange est également importante. Un broyage est important pour assurer une bonne décomposition. Pour les broyages des ligneux, un broyage à marteaux ou à fléaux est à préférer au broyage à couteaux. En effet, il est souhaitable que le bois soit éclaté pour permettre l'accès au cœur de la branche aux microorganismes. Le broyage doit être suffisamment fin pour que la décomposition se fasse à un bon rythme mais la structure doit permettre une bonne circulation de l'air, pour permettre une oxygénation optimale de l'andain. Ainsi, plus l'andain est grand, plus la structure doit être grossière. (Van der Wurff et al., 2016).

2. Température

La température joue un double rôle dans la maîtrise du compostage, c'est une variable qui est à la fois indicatrice et actrice du déroulement du processus. Effectivement, la température

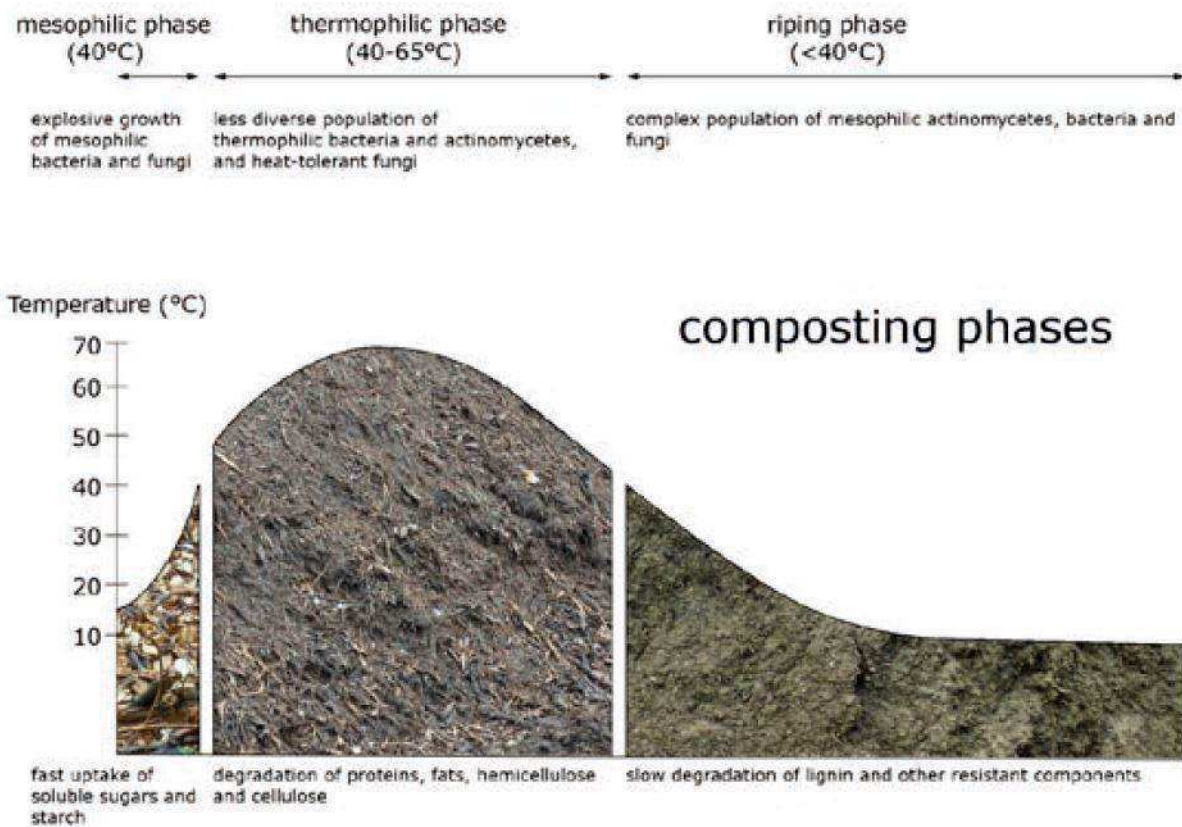


Figure 1 : Courbe théorique de l'évolution générale de la température en fonction du temps dans un compost bien réalisé et phases de compostage correspondantes. Illustration of the general evolution of the temperature throughout the composting process and corresponding stages. (Van der Wurff et al., 2016)

dépend directement de l'activité biologique, mais elle impacte également cette dernière. Ainsi, on décompose le compostage en différentes phases dépendant directement de la température du tas, l'évolution est présentée en figure 1 ci-contre :

- Une première phase mésophile : dès la formation de l'andain, les sucres et les acides aminés facilement disponibles sont métabolisés, la croissance des populations microbiennes mésophiles est extrêmement rapide. Cette phase ne dure que quelques jours, jusqu'à ce que le cœur de l'andain atteigne 40°C ou 45°C (Misra et al., 2005). C'est l'intense activité microbienne qui entraîne cette montée en température. Les bactéries sont généralement plus compétitives que les organismes fongiques durant cette phase. On y trouve souvent des bactéries des genres *Lactobacillus* et *Acetobacter*. Elles sont responsables de la production d'acides (lactiques et acétiques) qui peuvent s'accumuler temporairement et entraîner une chute du pH, mais d'autres groupes de bactéries dégradent rapidement ces molécules acidogènes. (Ryckeboer et al., 2003).
- La phase thermophile : Les processus décrits précédemment continuent et la température atteint rapidement une valeur supérieure à 60°C. De nombreuses espèces microbiennes sont inactivées par les conditions. La température peut dépasser les 70°C, auquel cas il faut la contrôler (en arrosant le tas par exemple). En effet, une trop haute température diminue la diversité des microorganismes présents et décroît la vitesse et la qualité de la décomposition. La durée de cette étape varie de 2 à 8 semaines et dépend du mélange initial et des conditions d'aération et d'humidité. Elle dure jusqu'à ce que toute la MO facilement décomposable soit démantelée. (Van der Wurff et al., 2016) Les molécules organiques dégradées sont un peu plus complexes que sur la première phase, il s'agit par exemple de cellulose, de protéines et de graisses. La dégradation de nombreuses chaînes peptidiques entraîne une libération d'ammoniac et une augmentation du pH. L'immense majorité des organismes fongiques sont inactivés lors de cette phase. Les bactéries encore actives sont thermophiles, la communauté microbienne est alors dominée par les genres *Bacillus* et *Actinomycètes*. (Insam, de Bertoldi, 2007) Pour obtenir un compost homogène de bonne qualité, il est recommandé de brasser le compost durant cette phase, qui permet l'hygiénisation du produit, en le débarrassant des graines d'adventices et d'espèces fongiques phytopathogènes. L'hygiénisation est garantie et considérée comme réglementaire si la température dépasse 55°C pendant une durée cumulée de 3 semaines ou la température de 65°C pendant une durée cumulée d'une semaine.
- La phase de refroidissement, ou seconde phase mésophile : l'activité microbienne décroît progressivement et le compost est recolonisé par des espèces qui préfèrent des températures de 25 à 40°C. Bien que les températures soient similaires à la phase initiale de montée en température, la communauté microbienne est différente car les activités métaboliques ne sont plus les mêmes, les caractéristiques chimiques ayant bien évolué au cours de la phase chaude. On retrouve dans cette phase de nombreuses bactéries qui dégradent la cellulose ainsi que des champignons comme ceux du genre *Aspergillus* par exemple. (Ryckeboer et al., 2003). Au cours de cette phase, les molécules organiques restantes sont des molécules complexes, difficilement dégradables. Cela résulte en une importante concurrence qui bénéficie à de nombreuses espèces bactériennes et



Figure 2 : Deux exemples de retourneurs d'andain pour des stations de compostage d'échelles différentes. Two examples of compost reversers for different scales of composting stations. (franceenvironnement.com, 2019) et (agriexpo.online, 2019)

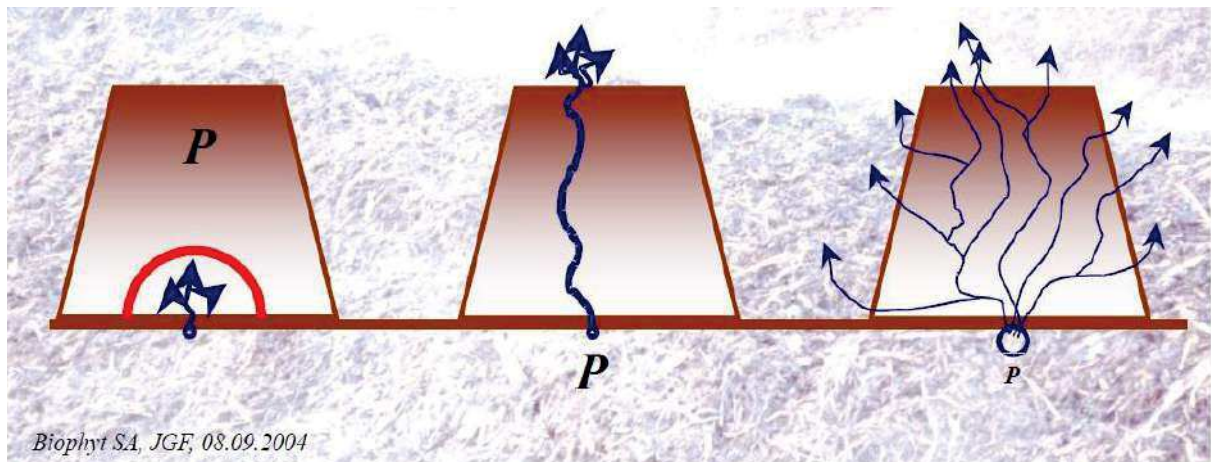


Figure 3 : Schéma de chemins d'air possibles dans un andain en ventilation forcée. A gauche, la pression est trop faible pour que l'ensemble de la matière soit oxygéné ; au milieu la pression est trop forte et l'air prend un chemin de sortie préférentiel ; à droite la pression est bien gérée et l'air se répartit bien. Scheme of possible airways in a forced ventilation windrow. On the left the pressure is too low to oxygen the whole material ; in the centre the pressure is too high so air use a preferential ways out ; on the right the pressure is well managed so does oxygenation. (Fuchs, 2004)

fongiques bénéfiques pour les cultures, notamment des espèces mycoparasitiques ou qui sécrètent des antibiotiques.

- La phase de maturation et de conservation : le compost est de retour à une température proche de la température ambiante, l'activité microbienne est réduite mais toujours présente. La communauté a de nouveau changé et on y trouve des espèces capables de s'attaquer aux molécules les plus complexes et inaccessibles de lignines par exemple. La composition chimique du compost évolue peu désormais, pourvu qu'il reste dans des conditions aérobies. (Van der Wurff et al., 2016)

Si la température joue un rôle essentiel dans le déroulement du compostage, on ne peut la modifier qu'indirectement, en jouant sur les paramètres que sont l'aération et l'humidité de l'andain.

3. Aération :

Les microorganismes permettant le compostage respirent, ils ont donc des besoins en dioxygène (O_2) qui varient au cours du temps. Au maximum de leur besoin, il faut 0,9 à 2L(O_2) /kg substance organique / heure ce qui correspond à un volume d'air de 4 à 7,2 L/kg/h (Fuchs, 2004). Différentes techniques existent pour assurer l'oxygénation du tas. On peut les placer en deux grandes catégories : le brassage mécanique et l'aération forcée.

Dans le cas du brassage mécanique, le rythme de brassage varie selon les sources de préconisations, mais il s'agit généralement de brasser activement le tas dès que la température redescend sous les 60°C lors de la phase thermophile, puis de le brasser à nouveau une à quatre fois lors de la phase de refroidissement. Ce brassage peut être réalisé de différentes manières qui varient selon les quantités à traiter, l'espace disponible, l'investissement initial et le temps de travail requis. La figure 2 présente deux types de retourneurs d'andain très différents par exemple.

L'aération forcée consiste à faire passer des gaines percées sous l'andain, dans lesquelles de l'air est insufflé. Il est important que les trous soient assez gros et nombreux pour éviter que l'air n'emprunte un chemin de sortie préférentiel et soit ainsi mal distribué. La pression ne doit pas être trop élevée pour éviter ce phénomène de chemin préférentiel, mais suffisamment pour que l'ensemble de l'andain en bénéficie (voir figure 3). Généralement, les systèmes en ventilation forcée sont couplés à des thermomètres et des logiciels afin de déclencher automatique la ventilation quand la température passe sous une valeur seuil. La ventilation forcée ne dispense pas d'effectuer au minimum un brassage mécanique, afin d'assurer l'homogénéité du produit. Ces systèmes sont souvent plus onéreux en investissement initial mais permettent de composter une plus grande quantité de matière par unité d'espace, avec un meilleur suivi du processus et une charge de travail moins importante par volume produit. (Fuchs, 2004 ; Van der Wurff et al., 2016).

Une chute rapide de température des tas en cours de processus peut être révélatrice d'un problème d'oxygénation de tout ou partie de l'andain, d'une surhumidification ou au contraire d'une sécheresse de la MO en décomposition.

4. Humidité

L'humidité du milieu est en effet un paramètre très important du processus de compostage. Les microorganismes ont besoin d'un milieu humide pour survivre et être actifs. La plupart des organismes fongiques sont moins sensibles au stress hydrique que les bactéries, ils sont inactivés par les conditions sèches mais survivent généralement et se réactivent lorsque



Figure 2 : résultats possibles du "test du poing". A gauche, le compost est trop mouillé ; au centre il est optimal ; à droite il est trop sec. Possible results of the « fist test”. On the left the compost is too wet, in the center it is an optimum, on the right it is too dry (Van der Wurff et al., 2016)

Tableau 3 : Compositions chimiques de 3 types de composts utilisés en Suisse. La valeur médiane est indiquée, entre parenthèse sont présentées les valeurs minimales et maximales. Chemical values of 3 types of composts used in Switzerland. There is the median, and the extremums in brackets. (Van der Wurff et al., 2016)

Chemical characteristic	Compost for agricultural use	Compost for horticultural use	Compost for greenhouse cultivation and gardening
DM	50.8 (28.2-73.4)	56.7 (40.8-71.1)	56.3 (32.2-64.5)
OM	47.7 (17.0-80.1)	38.1 (23.9-54.7)	30.6 (20.9-52.8)
salt content	862 (361-1580)	787 (173-2657)	660 (328-1539)
pH	8.2 (7.5-8.7)	8.1 (7.6-8.7)	7.9 (7.2-8.5)
N	16.6 (8.7-26.0)	14.6 (9.2-27.6)	15.1 (8.6-25.2)
P	3.0 (1.7-6.1)	3.0 (1.3-12.7)	3.3 (2.1-8.8)
K	12.0 (5.7-25.2)	11.6 (2.2-20.7)	10.7 (5.5-27.8)
Mg	4.8 (3.6-10.3)	6.5 (4.4-10.7)	6.5 (4.4-13.3)
Ca	53.1 (24.0-83.7)	64.0 (35.0-91.5)	44.5 (29.5-69.4)
Fe	8.8 (2.9-16.7)	10.1 (5.4-14.7)	12.0 (6.1-15.8)

DM (dry matter) is given in % of fresh material, OM (organic matter) in % of DM, macronutrients (N, P, K, Mg, Ca) in g/kg DM, micronutrients (Fe) in mg/kg DM, salt contents in mg KCl/100 g fresh manure, pH is determined in 1:2 water extract.

l'humidité remonte. En revanche les bactéries ne survivent pas en dehors des biofilms qui disparaissent en conditions sèches. Les biofilms sont des milieux aqueux où se développent des communautés multicellulaires où les microorganismes adhèrent entre eux. Plus ou moins complexes, les biofilms constituent les milieux de vie de la majorité des microorganismes sur Terre. Le biofilm est en quelques sortes aux organismes unicellulaires ce que les tissus sont aux cellules des organismes complexes. (Costerton et al., 1994). Ainsi, une humidité relative de 30% est le minimum dans un tas de compost, et l'optimum est situé entre 45% et 55%.

Il est recommandé d'effectuer le « test du poing » une à deux fois par semaine. Cela consiste à prélever une poignée de compost en profondeur (à environ 40-50cm de la surface), puis de la presser aussi fort que possible dans le poing si de l'eau en ressort, c'est que le compost est trop mouillé (voir figure 4). Ceci conduit à l'anaérobiose du tas et au lessivage de nutriments qui risquent d'eutrophier l'environnement. Si la boule de compost formée tient dans la main en gardant sa forme, c'est que l'humidité est optimale, si elle se désintègre, le compost est trop sec. (Van der Wurff et al., 2016)

2. Un intrant au service de l'agroécologie

Le compost peut être utilisé tant en serre que dans des champs. Il est très lié à la notion d'agroécologie, ayant des effets bénéfiques tant en termes de production agronomique que sur l'environnement, à l'échelle de l'agroécosystème comme à celle du globe.

1. Fertilité physico-chimique

Les composts permettent de nourrir les sols agricoles et horticoles. Les apports en nutriments peuvent grandement varier comme l'indique le tableau 3 présentant les valeurs médianes de 3 composts suisses aux utilisations différentes. Si on distingue une légère variabilité dans les valeurs médianes, les valeurs extrêmes indiquées entre parenthèses révèlent un grand étalement des valeurs au sein de chaque catégorie et des teneurs en certains éléments qui varient parfois d'un facteur 20 (Fuchs et al., 2008). On remarque que le pH est légèrement basique, cet élément peut se révéler important sur sols acides, permettant de limiter les besoins en chaulage, augmentant la disponibilité des nutriments. Une étude allemande a démontré que sur le long terme, un apport régulier de 6 à 10 tonnes de compost par hectare et par an a augmenté de 30 à 50% la disponibilité du phosphore et de 40 à 55% celle du potassium. Cela se traduit par une augmentation de 1,0 mg de P_2O_5 et de 1,3 mg de K_2O /100g de sol (Kluge, 2001).

S'il apporte des nutriments, un des aspects de la fertilité du sol que le compost peut le plus améliorer est sa fertilité physique. En effet, des études ont démontré plusieurs qualités des amendements compostés pour améliorer la structure du sol. Ainsi il impacte positivement la stabilité du sol en favorisant la stabilisation des agrégats, mais aussi la macroporosité, permettant de meilleures conductivités et capacités de rétention de l'eau et de l'air. (Abujabhah et al., 2015 ; Bossuyt et al., 2001 ; Yazdanpanah et al., 2015)

2. Fertilité biologique et résilience

En plus des effets directs évoqués dans le précédent paragraphe, il a été prouvé que l'application de compost améliore souvent la qualité biologique des sols. Ainsi, l'application de compost permet d'améliorer la teneur en MO des sols et dynamise les activités microbienne et enzymatique du sol (Zaborowska et al., 2018). Les composts agissent en effet favorablement

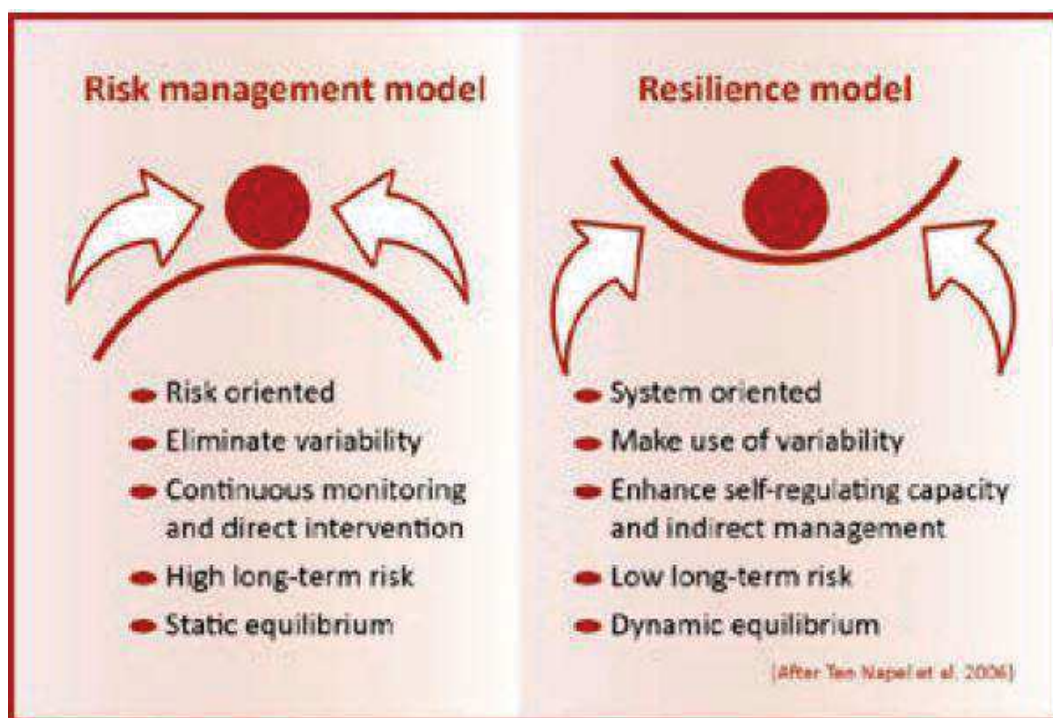


Figure 5: Représentation schématique des différences de stratégie entre un modèle basé sur la gestion des risques et un modèle basé sur un objectif de résilience maximale. Schematic summary of the differences between a risk management model and a resilience aiming model. (Ten Napel et al., 2006)

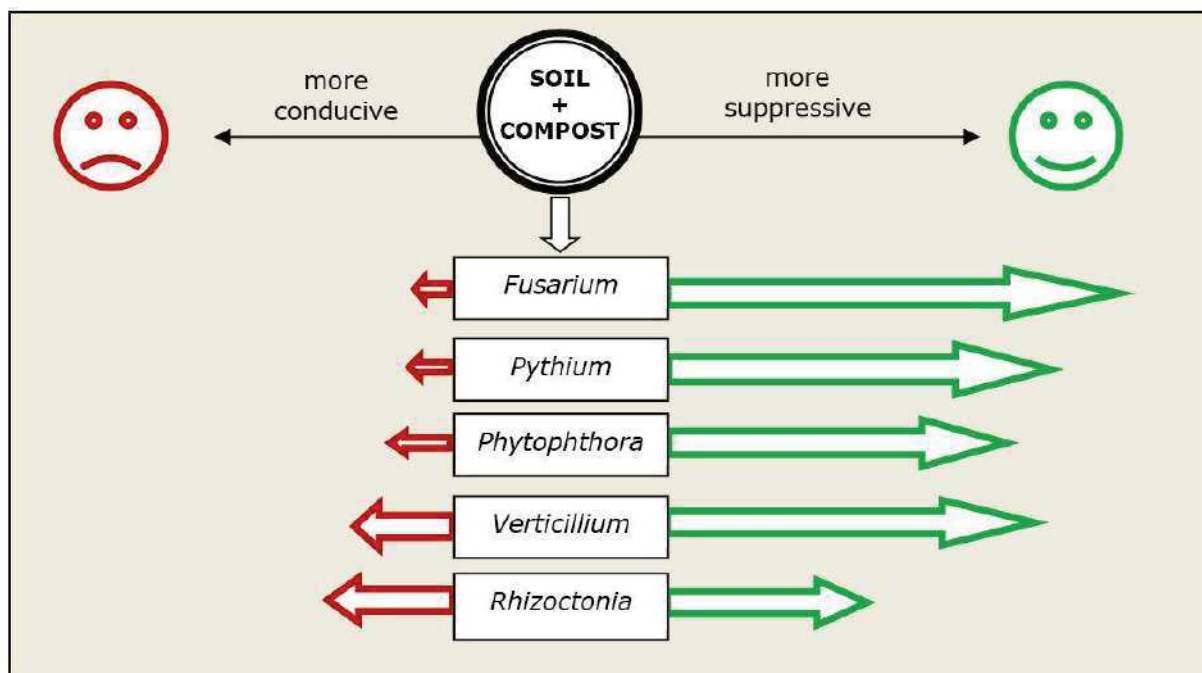


Figure 6: Représentation des résultats de la multi-analyse d'études relatant les interactions positives et négatives entre l'application de compost et les dégâts causés par cinq grandes maladies telluriques. Representation of the multi-analysis of studies about the positive and negative interactions between compost application and soilborne diseases damages. (Bonanomi et al., 2007)

services écosystémiques suivants : stockage, transport et transformation des nutriments, du carbone, de l'air et de l'eau, résistance à la compaction, à l'érosion et à la battance, régulation de paramètres biotiques (maladies d'origine telluriques par exemple). (Cuijpers et al., 2014)

On voit ainsi qu'en agissant bénéfiquement sur la vie du sol, l'application de compost améliore sa valeur agronomique. La résilience des systèmes est une des pierres angulaires des démarches d'agroécologie. D'après la FAO (Organisation des nations unies pour l'agriculture et l'alimentation), la résilience se définit comme « la capacité à prévenir les catastrophes et les crises ainsi qu'à anticiper, absorber les chocs et adapter ou rétablir la situation d'une manière rapide, efficace et durable. » Le développement de la résilience des agrosystèmes est une stratégie qui s'oppose à celle de la gestion des risques en systèmes de productions intensifs. Cette dernière repose sur la maîtrise du maximum de paramètres, étudiés généralement de manière isolée pour optimiser la productivité. Sa faible variabilité peut le rendre vulnérable et sa dépendance à l'Homme est importante pour intervenir en cas variation des conditions menaçant la production. Par opposition, un système qui se veut résilient repose sur une vision systémique, en faisant par exemple le choix de favoriser la variabilité pour en tirer profit, notamment en termes d'auto-régulation des déséquilibres. Souvent moins productif à court-terme, ce modèle est nettement plus durable. Les manières de penser l'agrosystème varient grandement, et cette opposition est illustrée schématiquement par la figure 5 (Ten Napel et al., 2006).

Si les composts modifient les communautés bactériennes, ce sont surtout les communautés fongiques qui sont impactées lors de l'application de compost. L'amélioration des capacités de mycorhization a été ainsi observée, ainsi que l'ensemencement en champignons du genre *Trichoderma*, qui assurent une protection aux racines des plantes en colonisant rapidement la rhizosphère sans porter préjudice aux plantes, et en les protégeant en tant que flore antagoniste des phytopathogènes, mais aussi des nématodes. (Van der Wurff et al., 2010). Une équipe pilotée par le chercheur de l'université de Naples Giuliano Bonanomi a analysé plus de 250 articles scientifiques évoquant les maladies d'origine telluriques et l'impact des amendements organiques sur ces maladies. Le résultat, résumé par l'illustration de la figure 6 a révélé que l'application de compost améliorait dans la majorité des cas la résistance des cultures, alors que dans moins de 12% des cas, les symptômes des maladies étaient augmentés. Ainsi, dans 74% des études, la résistance au *Fusarium* était améliorée, contre 23% d'études ne révélant pas d'effet significatif et 3% montrant un effet d'aggravation des symptômes. La résistance aux *Pythium*, *Phytophthora* et *Verticillium* était améliorée dans approximativement 60% des études, tandis que les symptômes étaient aggravés dans moins de 10% des cas pour *Pythium* et *Phytophthora* contre 18% pour *Verticillium* (Bonanomi et al., 2007).

3. Environnement

En plus des impacts bénéfiques pour la production agricole, cette amélioration de la biodiversité et des services écosystémiques contribue à une amélioration globale de la situation environnementale à différentes échelles. Les effets bénéfiques en termes de fertilité du sol et de santé des plantes évoqués précédemment conduisent évidemment à une diminution des besoins en intrants de synthèse. Le développement de l'utilisation du compost dans le monde agricole limite ainsi l'usage de produits polluants comme les engrais chimiques ou les pesticides qui impactent l'environnement lors de leur production ou de leur utilisation. De plus, l'application de composts permet d'améliorer la détoxification et la filtration de polluants par les sols, ainsi qu'une régulation de la composition atmosphérique de l'environnement local (Cuijpers et al., 2014).

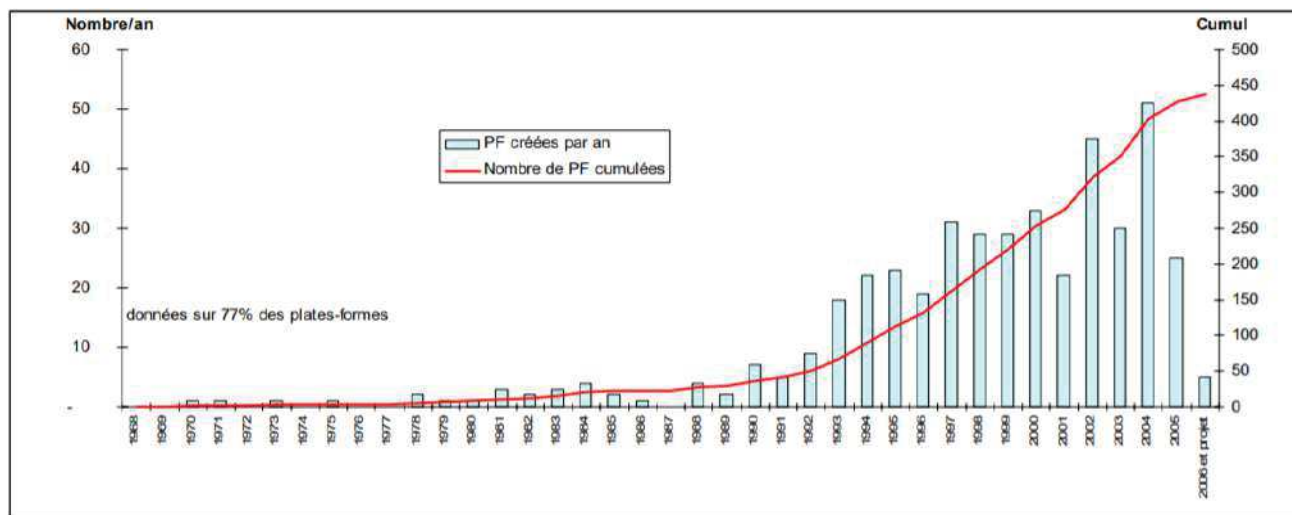


Figure 7 : Evolution du nombre de plateformes de compostage en France selon l'année de mise en service entre 1968 et 2005. Evolution of the number of composting stations depending on the starting year in France, from 1968 to 2005. (ADEME, 2007)

Un des enjeux au développement du compostage, notamment végétal est également la lutte contre le changement climatique. S'il est une alternative au brûlage des déchets verts qui sont une source d'émission de dioxyde de carbone (CO_2), il permet surtout le stockage de carbone stable dans les sols agricoles. Or, ce stockage est aujourd'hui présenté comme un des leviers les plus intéressants pour limiter le changement climatique. Ainsi, le projet *4 pour 1000* lancé à l'initiative de la France le 1^{er} décembre 2015 dans le cadre de la COP21 révèle qu'une augmentation annuelle de 0,4% (donc 4‰) de la teneur en carbone des sols agricoles permettrait, en plus d'une amélioration de la fertilité des sols, de compenser la hausse des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines (4 pour 1000, 2016).

3. Un développement récent, qui s'accélère

L'intérêt scientifique et technique pour les procédés de compostage et de recyclage des déchets organiques est encore très récent. La marge d'amélioration des milieux agricole et industriel en la matière est encore probablement importante, et son ancrage comme une pratique agricole incontournable ne tient plus du postulat : ce n'est qu'une question de temps

1. Une efficacité technique améliorée

Il y a encore quelques décennies, la décomposition des déchets organiques étaient mal connus et le compostage se résumait à leur entassement dans des trous effectués dans le sol pour qu'ils s'humifient. L'essor des connaissances scientifiques et des moyens techniques (mécanisation, développement des technologies de l'information etc.) ont permis très récemment l'important développement du compostage au sein de la société, qu'il s'agisse du compostage domestique, de déchets municipaux, ou agricoles. Les premiers retourneurs d'andain permettant un brassage efficace et adapté du compost datent des années 1990, et chaque année de nouveaux modèles, plus performants, sortent des usines. (FAO, 2015)

Si la quantité de déchets à recycler et la vitesse de ce recyclage par voie de compostage ont pu largement augmenter, la qualité des produits également. La connaissance et la maîtrise des phases clés du processus ont permis une bien meilleure valorisation de ce recyclage. En effet, la perte de nutriments est moindre et l'hygiénisation est meilleure qu'avant (FAO, 2015).

2. Vers la société du recyclage

Si les moyens de produire se sont améliorés et que de conséquents investissements ont été réalisés, c'est aussi lié à une tendance globale d'une société qui aspire à plus de durabilité. Les initiatives se développent et la réglementation évolue elle aussi, pour favoriser le recyclage et les économies de ressources. Comme le montre la figure 7, on ne comptait aucune plateforme entièrement dédiée au compostage en France avant les années 1970, mais leur nombre a connu une croissance soutenue, au moins jusqu'en 2005. Cette hausse a perduré depuis est amenée à continuer à l'avenir. (ADEME : Agence de l'Environnement de la Maîtrise de l'Energie, 2007)

Ainsi, depuis une circulaire du 18 novembre 2011, il est interdit de brûler des déchets verts. Des dérogations existent encore, pour les agriculteurs notamment, mais l'encadrement de la gestion des déchets verts augmente, avec pour objectif une valorisation totale de ces derniers en France. De même, la réglementation évolutive des producteurs de biodéchets, évoquée dans l'introduction abaisse régulièrement, depuis 2012, le seuil de biodéchets obligeant le producteur à une valorisation. Initialement à 120 tonnes, ce seuil est à présent abaissé à 10, comme présenté en annexe. La loi prévoit une généralisation du tri à la source et de la valorisation des biodéchets en France pour 2025 (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2017).

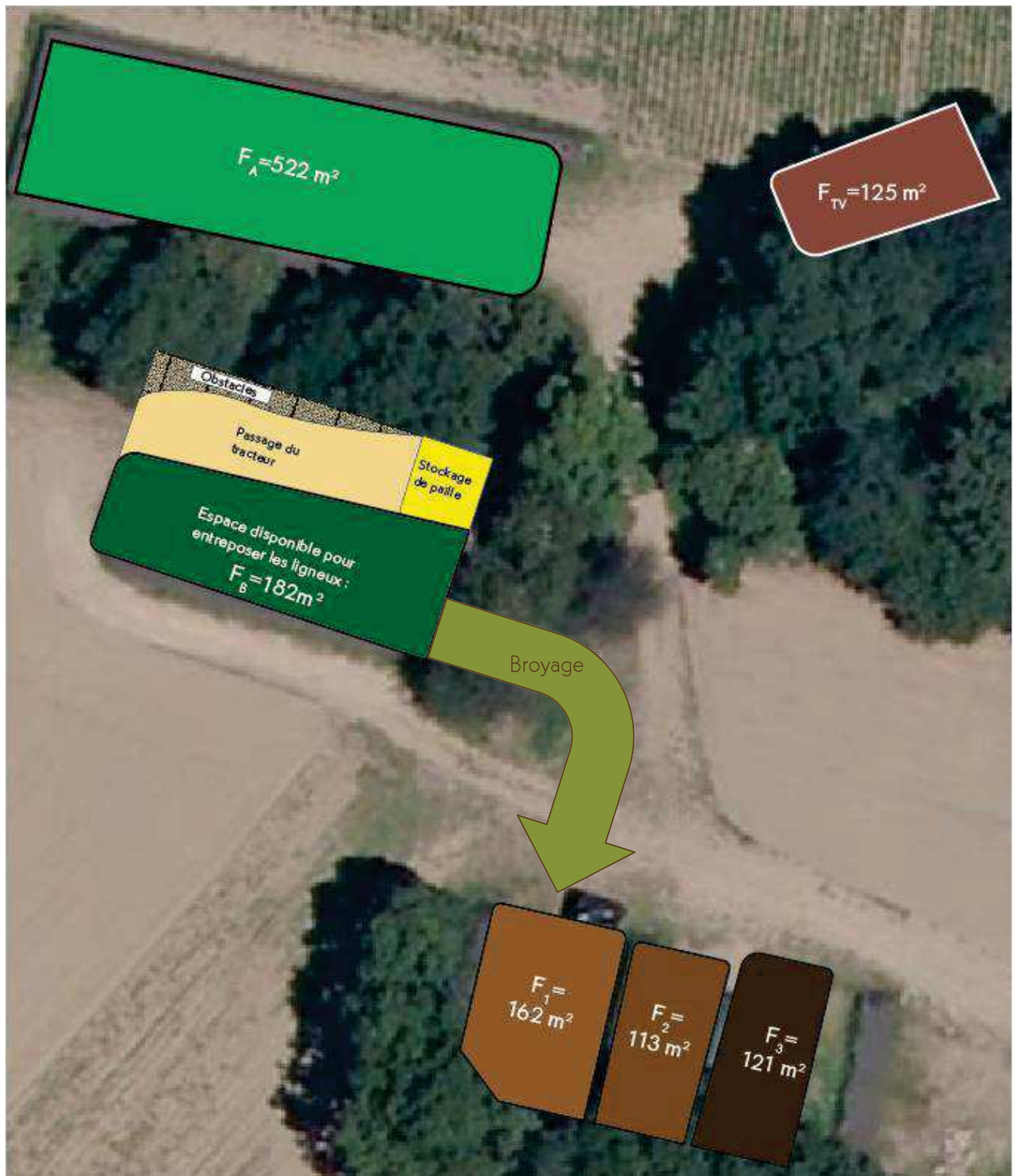


Figure 8 : Plan global de la station pré-stage. Map of the station before the internship

II. Etat initial

1. Présentation globale : un recyclage peu maîtrisé

Le manque de temps allouable à la valorisation par voie de compostage en interne a conduit à une méthode largement améliorable. Le recyclage des déchets végétaux tel qu'effectué jusqu'à présent ne peut en effet être véritablement qualifié de compostage. La plupart de la décomposition s'effectue actuellement dans des conditions proches de l'anaérobiose, en suivant le processus décrit ci-après.

Les déchets ligneux sont entreposés jusqu'à saturation du silo prévu à cet effet : voir F_B sur la figure 6. L'espace au sol occupé par ce silo est de 182 m^2 , la hauteur peut grandement varier, selon les types de bois entreposés (les tas de grandes branches avec de nombreuses ramifications peuvent monter jusqu'à 4m de haut). Une fois broyé, le volume occupé est grandement diminué, puisque l'on atteint une épaisseur de broyat qui va de 50 à 150 cm, ce qui correspond donc à un volume compris entre 95 et 270 m^3 (il y a une grande variabilité selon les années). Le bois broyé est ensuite placé dans la fumière F_1 , on y ajoute progressivement les tontes de l'année en cours et les feuilles ramassées au sol.

Après une durée d'environ un an, le contenu est mélangé en étant transféré dans la fumière F_2 à l'aide d'un épandeur à fumier, avant d'être bâché. Il y restera également pour une durée d'environ une année avant d'être brassé de nouveau et mélangé à du sable et de la terre végétale (issue de la fumière F_{TV}) au moyen du même épandeur pour être placé dans la fumière F_3 . Pendant l'année suivante, ce mélange termine sa « maturation » tout en étant régulièrement prélevé pour les besoins du service ethnobotanique. C'est lorsque cette fumière est vide que les déplacements d'une fumière à l'autre ont lieu. La F_A était la fumière « historique » de dépôt de déchets verts. Depuis la mise en place des autres, elle sert à déposer tous les suppléments qui ne rentrent pas dans les autres fumières et elle constitue notamment le lieu de dépôt des nombreux adventices issues du désherbage des serres ou des champs. Elle est donc très sale en l'état actuel, composée de déchets verts très hétérogènes et n'est pas intégrée dans le système de recyclage.

Au regard des informations de la partie précédente, on constate une grande marge d'amélioration du processus de recyclage végétal. La durée de décomposition peut théoriquement être divisée par dix, en passant de trente-six mois à trois mois et demi en améliorant certains points :

- La maîtrise de l'aération, tant en cours de décomposition qu'au stockage du produit final, cela commence par ne plus placer le produit en anaérobiose en « l'étouffant » avec des bâches imperméables à l'air. Le brassage est également un point à améliorer, le mélange à l'épandeur n'ayant lieu qu'une fois, pour une importante quantité de végétaux, conduisant à une hétérogénéité dans les tas, et une montée en température probablement insuffisante.
- Les quantités d'entrants sont irrégulières, mal connues et non planifiées dans le temps. La gestion spatio-temporelle des entrants est à améliorer, ceux-là étant gérés à court terme, déposés là où il y a de la place puis gérés quand l'emploi du temps le permet, de manière non-prioritaire. De plus, aucun tri n'est effectué au sein des tas de matières déposés alors que certains déchargements comprennent des matières non biodégradables.
- La gestion de l'humidité de la matière en décomposition est également un point clé du processus, qui pour l'instant n'est pas du tout maîtrisé.

2. Propriétés techniques du produit

1. Ressenti des usagers

Une des premières étapes de la mission a été d'échanger avec les usagers du produit, notamment les membres du service botanique et espaces verts, qui sont pour l'instant les seuls à l'utiliser. Ces échanges ont permis de définir précisément les usages du produit actuel et d'évoquer les possibles usages du produit futur. Cela a été l'occasion de recueillir les critiques de l'existant sur les principaux points à améliorer :

- Présence de morceaux de bois trop volumineux
- Présence de déchets plastiques en tous genres
- Dureté lorsque le substrat se ressuie (« du béton ! »)
- Aucune valeur fertilisante *a priori*
- Stock de graines adventices important
- Hétérogénéité du produit

2. Propriétés chimiques

Les caractéristiques chimiques du produit initial ont été analysées par le laboratoire *Auréa* en Août 2019, en même temps que celles des différents produits réalisés lors de la mission. Le 26 juillet, des prélèvements ont été faits dans divers endroits du tas pour être mélangés et expédiés au laboratoire. Le détail des résultats est présenté en annexe.

On remarque que le produit initial est très sec avec une valeur de 71,3% de MS (Matière Sèche). Le pH de 7,5 est plutôt faible, d'autant que les terres exploitées par le groupe Rocher sont principalement situées sur terrains acides.

3. Propriétés physiques

Au cours de la mission, une étude en laboratoire de la porosité du compost pré-stage, simultanément à celle des différents produits de l'expérimentation a également été réalisée, suivant le protocole présenté en page 35. Ces analyses ont été effectuées directement au sein des locaux de La Gacilly. On remarque le produit est très dense est présente une porosité de 73%. L'intégralité des résultats est présentée en annexe.

4. Propriétés biologiques

Contrairement à un engrais de synthèse, le compost est un produit vivant, il présente donc des caractéristiques biologiques qu'il est important de connaître pour en adapter son usage. Les résultats d'analyse du laboratoire *Auréa* révèlent une teneur en MO de 16,68%, ce qui semble très faible pour un compost au regard des valeurs présentées dans le tableau 3 (page 16), cela pourrait s'expliquer par la très longue durée de décomposition. En plus de ces analyses effectuées par le laboratoire *Auréa*, des analyses ont pu être réalisées directement au sein du service agrobotanique, portant sur le salissement du compost et sa phytotoxicité.



Figure 9 : Photographie des plaques alvéolées peu après le premier faux semis. Picture of the seeding plate during the fake seed bed test

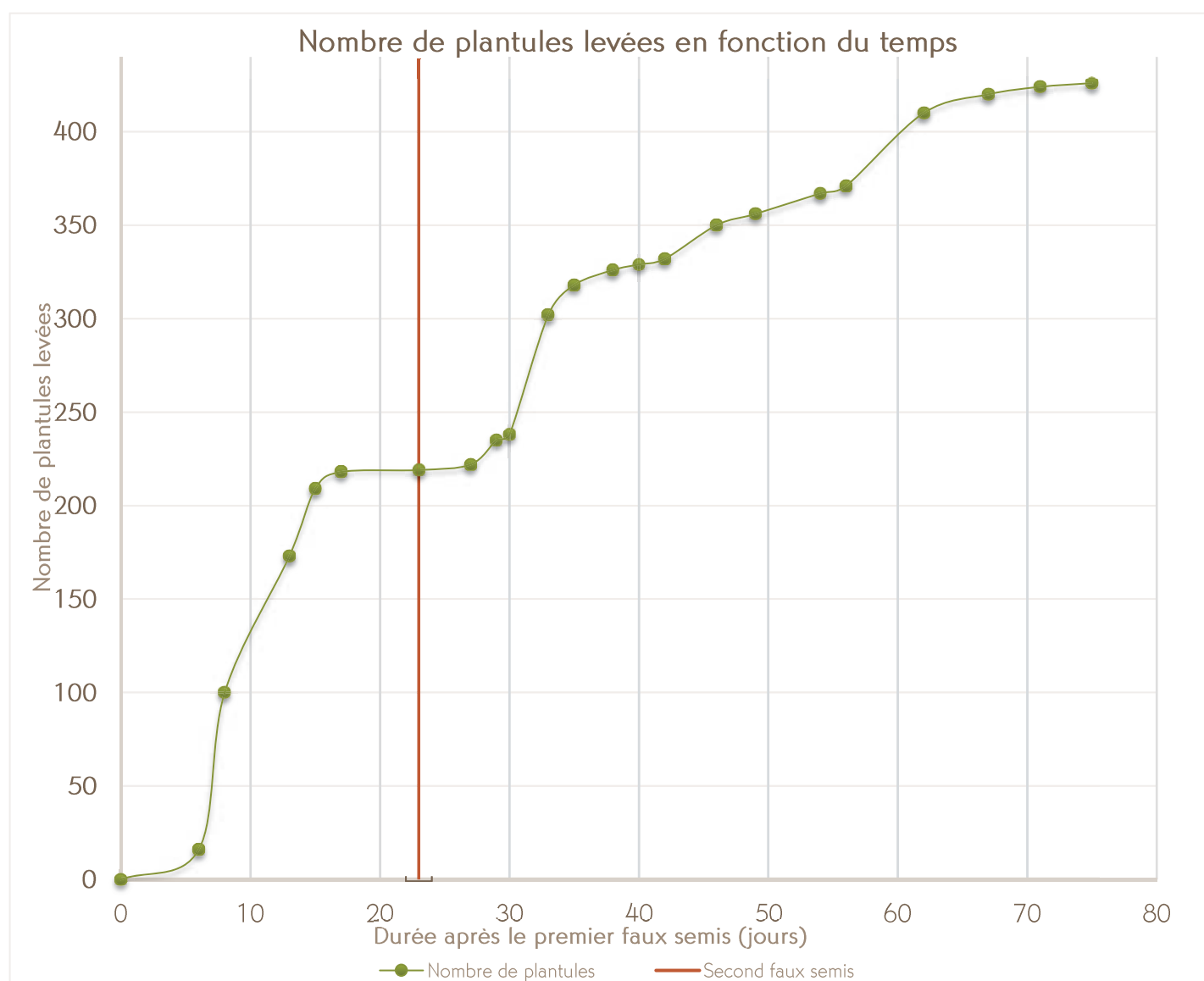


Figure 10 : Représentation de l'évolution du nombre d'adventices levées. Representation of the evolution of weeds' raises

1) Malherbologie

Afin d'étudier le salissement par les adventices du produit antérieur à cette mission, 12 ± 1 litres de ce substrat ont été prélevés dans divers endroits de la fumière F_3 . Après avoir été mélangés, ils ont simplement été placés dans 3 plaques de semis alvéolées (20 alvéoles chacune), on appellera cette étape « faux semis », elle est illustrée par la figure 7. La plaque est ensuite régulièrement arrosée afin de maintenir des conditions permettant la germination et la levée des plantes.

Un suivi régulier est ensuite fait, avec un, comptage du nombre de plantules, alvéole par alvéole. Après 3 semaines, un plateau est atteint, et certaines adventices abordait l'étape de grenaison. Un second faux semis a alors été effectué :

- Les plantules ayant précédemment levé ont toutes été arrachées
- L'ensemble du substrat déjà utilisé a été re-mélangé manuellement dans un seau puis réparti de nouveau dans 3 plaques alvéolées

L'expérience a pris fin après une durée de 75 jours, alors que les plantules avaient formé des graines et risquait de biaiser l'expérience en s'égrainant. Le choix a été fait de ne pas réaliser nouveau faux semis au vu lancement quelques jours plus tôt de l'expérience principale, portant sur les processus de compostage et les suivis de températures.

Sur la durée de cette expérience, un total de 426 plantules ont levé, l'évolution de ce nombre au cours du temps est représenté en figure 8. Cela correspond donc à une concentration en graines minimum de $35'500 \pm 2'950$ graines viables par mètre cube de compost. Le niveau de salissement du produit est donc très important et c'est une caractéristique à améliorer à l'avenir. En effet , avoir un produit propre permettrait de limiter la contamination des parcelles et du jardin, permettant un meilleur développement des plantes d'intérêt et un gain de temps de travail considérable, dans les champs comme au jardin. Les charges opérationnelles liées au temps de travail de désherbage sont importantes pour le service, les diminuer serait souhaitable.

2) Phytotoxicité

Le test Cresson est un bon indicateur de la phytotoxicité d'un sol. L'opération consiste à observer le développement du Cresson alénois (*Lepidium sativum*) dans un substrat composé de compost dilué dans du terreau. Ce test est communément utilisé pour jauger la maturité et la phytotoxicité d'un compost. En effet, cette brassicacée connaît une germination et un développement très rapides, permettant d'obtenir en 7 jours des plantules exprimant d'éventuels symptômes en cas de présence de souches phytopathologiques ou de molécules polluantes. Les résultats observés pour se faire une idée de la toxicité éventuelle du sol pour la croissance des plantes sont ici le taux de germination, le taux de levée et la proportion de plantules en mauvais état ou non-viables après 7 jours. Les échantillons ont été dilués dans du terreau et 75 graines y ont été semées. Les résultats détaillés de l'expérience comparant les phytotoxicités du compost pré-stage et des différents composts réalisés au cours de la mission est présentée en annexe.

Le produit initial présente un taux de germination de 70%, pour une levée de 65% ce qui est correct. On remarque cependant que plus de 10% des plantules ne sont pas viables. Le taux de plantules en bon état parmi les graines semées n'est que de 40%. Cela représente près de 40% des plantules levées qui sont difformes ou non-viables. Cette valeur élevée révèle la probable présence de composés nuisant au développement optimal des plantes. Il peut s'agir de maladies fongiques ou de polluants. La présence de ces inhibiteurs de croissance peut s'expliquer

par une hygiénisation non maîtrisée. En l'absence de relevés de températures à la mise en place de ce tas, il n'est pas possible de vérifier. Le stockage et la longue durée de la décomposition ont pu apporter des maladies. A même la terre et entouré de merlons végétalisés, le tas a pu être contaminé après la phase d'hygiénisation, même si celle-ci avait été réalisée avec succès. Enfin, la présence de matériaux indésirables, tels les plastiques, pendant une durée aussi longue a pu apporter des polluants inorganiques en quantité suffisante pour expliquer ces problèmes de développement.

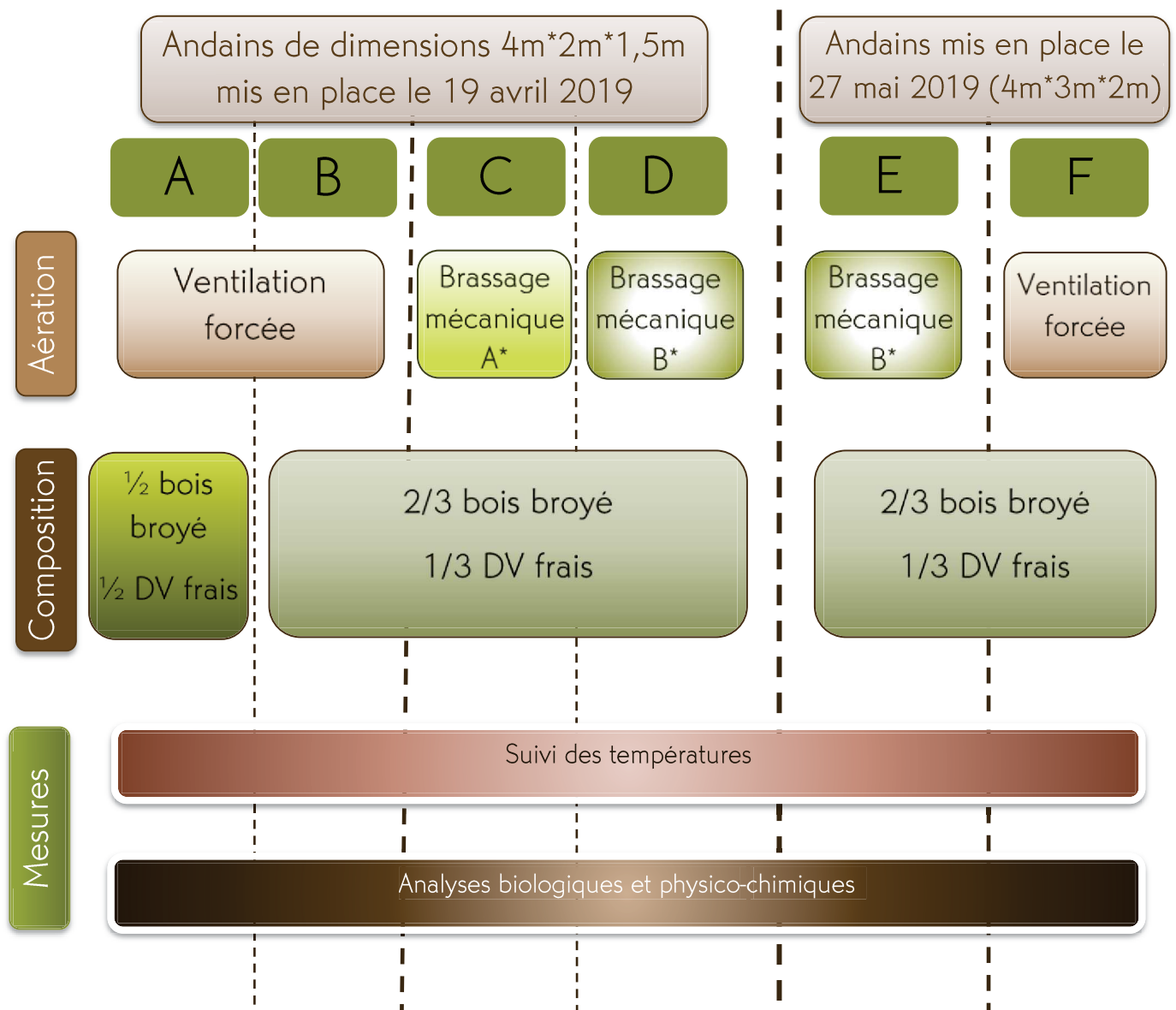
3. Une question non optionnelle

Le produit obtenu après les trois années de décomposition est pour l'instant uniquement utilisé par le service botanique pour du rempotage. Comme vu juste avant, il ne satisfait pas pleinement ses utilisateurs et a une valeur fertilisante très faible. Son amélioration est donc souhaitable.

De plus, la mise en place prochaine d'une installation industrielle de distillation ayant pour but la production d'hydrolats sur le site va entraîner une hausse des quantités de déchets organiques à traiter, un processus de décomposition plus efficace s'impose donc pour accélérer la vitesse de décomposition. A cela s'ajoute le dépassement du seuil réglementaire de 10t de biodéchets/an sur le restaurant d'entreprise qui doit être résolu. Ces dernières années, la réglementation relative aux déchets organiques évolue rapidement, et on peut légitimement supposer que son exigence va augmenter. Il est donc important d'améliorer ce point. L'entreprise Yves Rocher s'impose également un devoir d'optimisation et d'exemplarité technico-environnementale. Pour toutes ces raisons, l'amélioration du recyclage de matières végétales n'est aujourd'hui plus optionnelle.

Enfin, il y a une volonté de la part du service agronomie d'améliorer la fertilité des sols, dans une démarche agroécologique et dans un objectif d'amélioration continue. Cette valorisation des déchets en coproduits utiles à l'entreprise constitue donc un levier agro-économique intéressant.

Descriptif des différentes modalités



Planning retournage d'andain A et B

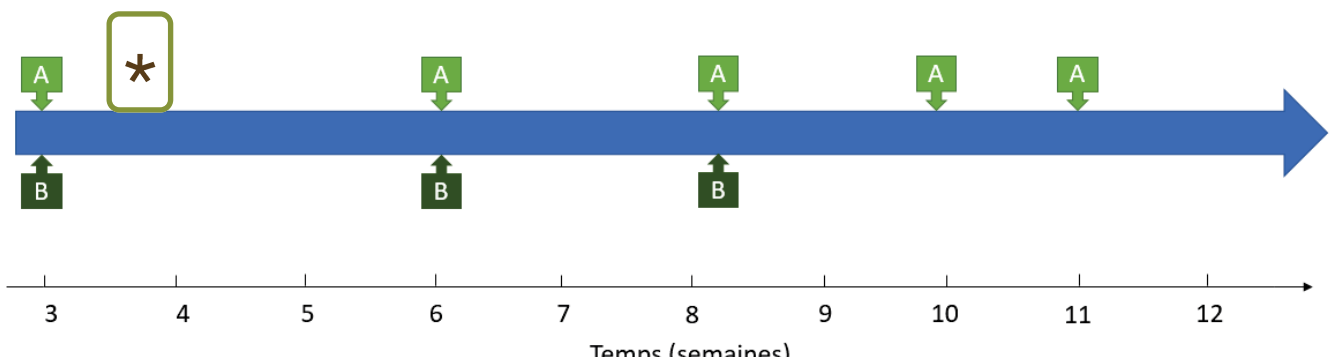


Figure 11 : Schéma représentant le dispositif expérimental. Scheme of the experimentation system

III. Analyse des axes d'amélioration

1. Expérimentation

1. Protocole et mise en place

La principale étude de la mission est une expérimentation visant à tester des procédés de compostage afin de déterminer lequel constituerait un optimum technico-économique de la valorisation sur place des coproduits dans le contexte d'exploitation de l'entreprise. Dans ce cadre, 4 méthodes différentes sont testées sur 8 andains expérimentaux. (N.B. : définition légale andain : dépôt longitudinal de matière organique en fermentation formé lors du procédé de compostage, que le procédé se déroule en milieu ouvert ou fermé)

Au vu des apports de l'étude bibliographique, le choix a été fait d'étudier deux critères principaux suivant les modalités : le procédé d'aération (et son rythme), et la composition initiale (proportion entre déchets ligneux et non-ligneux).

Le schéma ci-contre (figure 11) représente le dispositif expérimental. Les 8 andains ont été réalisés le 19 avril 2019. D'un format d'environ 4m*2m sur une hauteur d'1,50m, ils correspondent à 4 modalités répétées deux fois chacune. Les modalités A et B sont aérées par un dispositif dit de ventilation forcée : un large tube creux, percé, de 200mm de diamètre les traverse de part en part. L'effet cheminée dû à la montée en température des andains permet une circulation de l'air dans le tube qui ventile donc les andains. A cela s'ajoute une ventilation à l'aide d'un souffleur à feuilles pour faire passer un grand courant d'air à travers le tube, et donc à travers les andains. Ces modalités se différencient par leur composition initiale. La modalité A est constituée pour moitié de bois broyé, l'autre moitié correspondant à des végétaux frais (tontes et plantes issues du désherbage). La modalité B est, elle, constituée des mêmes ingrédients mais avec des proportions de respectivement 2 tiers et 1 tiers.

Les modalités C et D sont quant à elles aérées par un brassage mécanique. Les deux modalités divergent par leur nombre de brassages, représentés dans la 2^e partie du schéma. Ces deux modalités sont composées à 2 tiers de bois broyés et 1 tiers de végétaux frais (tontes et plantes issues du désherbage).

Les températures dans le cœur des andains sont relevées une à deux fois par jour, à l'aide d'un long thermomètre conçu pour cet usage. Ce suivi des températures donne une indication de l'avancement de « l'hygiénisation » du compost : il faut qu'à une température donnée (comprise entre 55 et 70°C) corresponde une durée minimale de dépassement, pour assurer l'inactivation des graines de végétaux comprises dans le mélange et la désinfection des parasites fongiques. Cette durée dépend de la température, à 55°C il faut compter trois semaines contre une seule à 65°C. La figure 10, page suivante présente les résultats.

Le processus total de maturation total du compost est supposé s'étendre sur une durée comprise entre 12 et 18 semaines. Les différents produits obtenus sont ensuite analysés du point de vue physico-chimique et biologique (hygiénisation réussie ou non et test « cresson » pour vérifier la fertilité du compost) et comparés, en mettant en relation les qualités du produit et les coûts de production de chacun des composts.

Après 5 semaines, le dispositif a finalement été agrandi par l'ajout 4 nouveaux andains, plus volumineux que les précédents. L'idée est d'observer l'impact de la taille de l'andain sur l'intérêt de l'installation d'un dispositif d'aération forcée. Ces 4 andains ont une largeur d'environ 3m pour une hauteur de 2m.

Ci-dessous se trouvent les conditions d'expérimentation initiales :

Matériel

- ④ Dispositif d'aération forcée : tuyau plastique percé régulièrement au niveau des andains pour diffuser l'air + souffleur de feuille à moteur thermique, pour insuffler l'air dans le tuyau
- ④ Chargeur télescopique équipé d'un godet de type « griffe/grappin » pour confectionner les andains et les brasser en l'absence du retourneur
- ④ Retourneur d'andain attelé sur tracteur (CUMA Aff-et-Vilaine)
- ④ Thermomètre à compost (1,50 m de longueur pour mesurer la température en cœur d'andain)
- ④ Déchets ligneux broyés
- ④ Déchets verts non-ligneux non-broyés
- ④ Deux bâches Lest'O Compost® perméable à l'air mais imperméable à l'eau, pour une meilleure gestion de l'humidité et éviter une lixiviation des éléments importants
- ④ Tonne à eau mobile pour irrigation du compost quand cela est nécessaire

Protocole

- ④ Mise en place de 4 andains alignés sur le dispositif d'aération forcée
- ④ Mise en place de 4 andains avec un espace suffisant pour permettre un retournement d'andain
- ④ Aération régulière des andains ventilés (environ 15min/jour)
- ④ Relevés de températures plusieurs fois par semaine, avec 3 mesures moyennées par andain
- ④ Observation de l'état d'humidité du matériau régulière et irrigation si nécessaire
- ④ Retournement des andains aux dates indiquées ci-contre au moyen du retourneur ou bien du chargeur télescopique et du godet grappin.
- ④ Analyses biologiques et physico-chimiques des différents produits obtenus et comparaison avec le produit antérieur

Dans les semaines qui ont suivi la mise en place de l'expérimentation, une discussion avec un expert en compostage, travaillant en Suisse à la FiBL (*Forschungsinstitut für biologischen Landbau* : Institut de recherche pour l'Agriculture Biologique en Allemagne, Autriche et Suisse) a débouché sur un agrandissement du dispositif. L'ajout de modalités avec des andains plus volumineux est apparu intéressant, afin d'augmenter le nombre d'individus statistiques et de renforcer l'éventuelle variabilité entre les aérations par ventilation et par brassage. En effet, des andains trop petits présentent une surface relative d'échange avec l'air importante, ce qui peut diminuer l'effet de la ventilation.

Deux modalités ont donc été rajoutées cinq semaines après le lancement des quatre premières. Chacune des modalités est répétée deux fois.

Par la suite, les andains réalisés le 19 avril seront qualifiés de « petits » et ceux réalisés le 27 mai de « gros ». Des photographies des matériel utilisés, de la mise en place de l'expérimentation et des andains sont présentées en annexe.

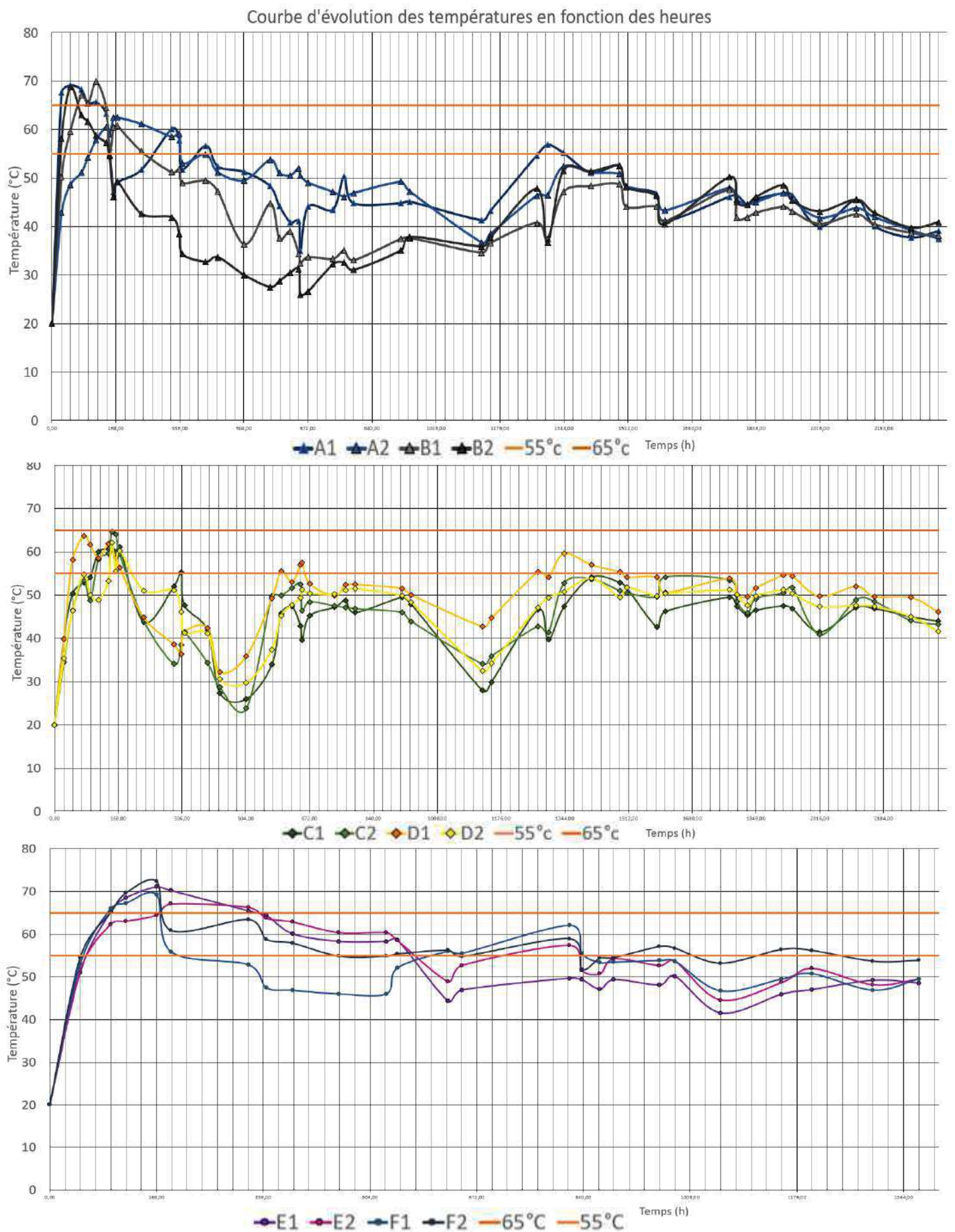


Figure 12 : Représentation des évolutions de température des différents andains en cours d'expérience. La grille principale représente les semaines et la grille secondaire les jours.
Representation of the temperatures' evolution. Main grid represents weeks and second grid days

2. Prélèvements et mesures

C'est à la fin de la mission qu'ont été effectuées les différentes analyses. Dans l'objectif d'obtenir un échantillon représentatif de chacune des modalités étudiées, des prélèvements ont été réalisés dans divers endroits de chaque andain. Entre trois et cinq zones de prélèvements, toujours situées à une distance de la surface d'au moins 25cm. Les prélèvements sont effectués à la main. Les grandes poignées prélevées sont placées dans un seau propre puis mélangées pour assurer une homogénéisation du prélèvement.

Le suivi des températures effectué au long de la mission est présenté ci-contre (figure 12). Pour une meilleure visibilité des résultats, les courbes ont été représentées sur trois graphiques différents. Les deux premiers graphiques représentent les évolutions de température des petits andains. Tout d'abord ceux qui sont aérés par ventilation forcée (modalités A et B), puis ceux qui ont été brassés mécaniquement (modalités C et D). Enfin, le dernier graphe représente les gros andains brassés (F) et ventilés (E). Sur chacun de ces graphes, les grilles verticales correspondent aux semaines (traits épais) et jours (traits plus fins, grille secondaire). Les deux seuils réglementaires d'hygiénisation, à 55°C et 65°C sont représentés en orange.

3. Analyses

Différentes analyses sont effectuées pour chaque échantillon prélevé. Pour l'ensemble de ces analyses, les 12 échantillons sont comparés à un échantillon du produit antérieur, réalisé avant la mission.

Le test cresson décrit précédemment a donc été réalisé au même moment pour chacun des produits de l'expérience et pour le produit antérieur. Le faux-semis pour observer la malherbologie a été effectué dans une version plus sommaire et rapide : une plaque de semis de 20 alvéoles par échantillon, avec un unique relevé du nombre d'adventice dix jours plus tard.

Pour la mesure de la porosité, elle a été effectuée directement au petit laboratoire du service agronomie de la manière suivante :

- 🔍 Réalisation par les services techniques de l'entreprise de cylindres métalliques résistant de volumes connus
- 🔍 Prélèvement des volumes de compost correspondant en plein cœur de l'andain : le cylindre est intégralement enfoncé à l'aide d'un marteau
- 🔍 Mise à l'étuve des échantillons prélevés pendant 48h à 95°C pour en évacuer toute l'humidité et mesure de la masse précise de sol correspondant → densité apparente $d_a = m_{\text{seche}} / V_{\text{prélevé}}$
- 🔍 Mesure précise de la densité réelle grâce au prélèvement d'une masse m_1 d'environ 30g, placée dans une fiole jaugée de 50 mL puis à l'ajout de méthanol à l'aide d'une burette graduée, jusqu'au trait de jauge. Le méthanol chasse l'air et l'eau et occupe tout le volume des pores. La différence entre les 50mL de la fiole et le volume précis de méthanol versé donne le volume réel v_1 de l'échantillon de sol, pores exclues. Réalisation de la même manipulation avec un second échantillon de masse m_2 d'environ 30g également. Les moyennes des deux masses m_r et des deux volumes v_r sont calculées. → densité réelle $d_r = m_r / v_r$
- 🔍 → porosité $p\% = d_a / d_r * 100$

Les autres mesures physiques et les mesures chimiques ont été réalisées par le laboratoire *Auréa*.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des nombres de jours où les températures moyennes des andains ont dépassé différentes valeurs seuils. Table of the number of days above different threshold temperature values.

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2
nombre de jours où $\theta > 65^{\circ}\text{C}$	5	0	3	1	0	0	0	0	7	6	1	1
nombre de jours où $\theta > 60^{\circ}\text{C}$	7	8	8	3	5	2	4	4	12	16	2	7
nombre de jours où $\theta > 55^{\circ}\text{C}$	15	12	12	6	8	7	21	5	19	20	16	27
nombre de jours où $\theta > 50^{\circ}\text{C}$	33	33	16	15	19	32	64	45	22	40	32	51

```
Call:
glm(formula = nb.jours.55 ~ taille, family = quasipoisson(link = log),
    data = compost)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.1049  -1.0332  -0.1109   0.6312   2.5793

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   3.0204     0.1637  18.450 1.85e-08 ***
taillepetit  -0.5969     0.2337  -2.554   0.031  *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for quasipoisson family taken to be 2.197615)

Null deviance: 33.580  on 10  degrees of freedom
Residual deviance: 19.401  on 9  degrees of freedom
AIC: NA

Number of Fisher Scoring iterations: 4

Call:
glm(formula = `nb-jours.60` ~ taille + ventilation + Compo_50_pourcents,
    family = quasipoisson(link = log), data = temp_biol4)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.3253  -0.4621  -0.1847   0.3515   1.3316

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   2.6391     0.1821  14.492 1.78e-06 ***
taillepetit  -1.0704     0.2680  -3.994  0.00523 **
ventilationoui -1.1350     0.3692  -3.074  0.01796 *
Compo_50_pourcentsoui 1.5813     0.4867   3.249  0.01408 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for quasipoisson family taken to be 0.9284852)

Null deviance: 23.2362  on 10  degrees of freedom
Residual deviance:  6.4263  on 7  degrees of freedom
AIC: NA

Number of Fisher Scoring iterations: 4
```

Figure 13 : impressions d'écran de la console de R révélant des effets significatifs des conditions de compostage sur les nombres de jours au-dessus de valeurs seuils. Screenshots of the R console revealing significant effects of the composting conditions on the number of days above threshold values.

2. Résultats et discussion

Une partie des résultats obtenus est présentée ici. L'ensemble des données brutes est disponible en annexe.

1. Températures et propriétés biologiques

a) Influence des paramètres sur les températures observées

Les relevés n'ayant pas pu être réalisés quotidiennement, les résultats ont été extrapolés à partir d'une fonction sur tableur de comptage prenant en compte les valeurs du jours précédent en cas de jours sans relevé. Pour chacune des modalités, les nombres de jours au-dessus de plusieurs seuils ont été retenus. Ces valeurs seuils de température sont de 50°C ; 55°C ; 60°C et 65°C. Les résultats sont présentés dans le tableau 4 ci-contre. On constate que seuls les andains D1, E1 et F2 sont hygiénisés de manière réglementaire, et que les andains A1 et E2 sont à la limite d'être considérés comme hygiénisés par la loi.

La dispersion des nombres de jours au-dessus de ces valeurs seuils correspond à celle d'un comptage. Le choix s'est porté sur une modélisation linéaire suivant une loi de quasi-poisson. Selon la valeur du paramètre de dispersion, on garde ce modèle de quasi-vraisemblance (valeur éloignée de 1) ou on applique le modèle Poisson classique (si la valeur est proche de 1). Pour chacune des valeurs seuils, les tests ont été menés suivant les facteurs taille (grand ou petit), composition (50% Déchets verts frais ou non) et ventilation forcée (oui ou non). Une analyse de la variance (ANOVA) est alors réalisée pour modéliser les éventuels effets significatifs.

Pour les valeurs de 65°C et 50°C, aucun effet significatif d'aucun facteur n'a pu être mis en évidence dans l'expérience.

Pour la valeur de 55°C, le seul facteur impactant significativement le nombre de jours dépassant le seuil est la taille de l'andain. Les andains plus volumineux ont en effet dépassé la valeur un nombre de jours significativement plus grand que les andains les moins volumineux. Les valeurs sont sur-dispersées et ce modèle de quasi-vraisemblance est gardé pour l'ANOVA

Pour la valeur de 60°C, les trois facteurs impactent significativement le nombre de jours avec une température supérieure. Ainsi, la petite taille d'andain et la présence de ventilation forcée entraînent un nombre de jours de dépassement de la valeur significativement plus petit. A l'inverse, la composition de déchets verts frais à part égale avec celle en déchets ligneux augmente significativement le nombre de jours où la température moyenne dépasse les 60°C. Cette fois la dispersion permet d'appliquer le modèle classique.

La différence de significativité observée de l'impact des conditions de compostage sur le nombre de jours au-dessus des valeurs seuils révèlent une faiblesse statistique des résultats de l'expérience. Cette fragilité statistique n'a rien de très surprenant au vu du nombre limité de répétitions de chacune des modalités.

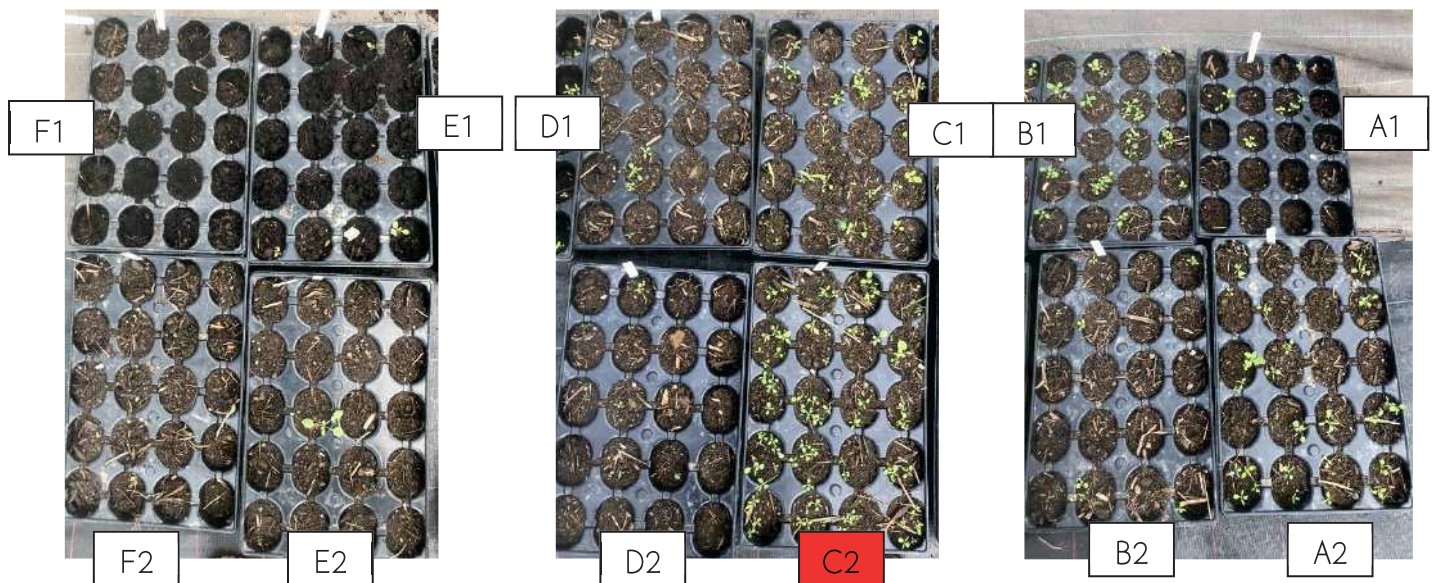


Figure 14 : photographies des plaques de semis prises 10 jours après la réalisation des faux semis. Pictures of seeding plates the 10 days after the false seed bed installation.



Figure 15 : boîtes de dispersion des levées d'adventices et des taux de germination du cresson alénois des modalités de l'expérience. Box plots of weeds raising and garden cress germination rates of the samples.

```
> anova(A, test="chi")
Analysis of Deviance Table

Model: quasipoisson, link: log
Response: adventices levees
Terms added sequentially (first to last)

      Df Deviance Resid. Df Resid. Dev Pr(>Chi)
NULL                                10    160.438
taille  1    65.301              9     95.136 0.007952 **
```

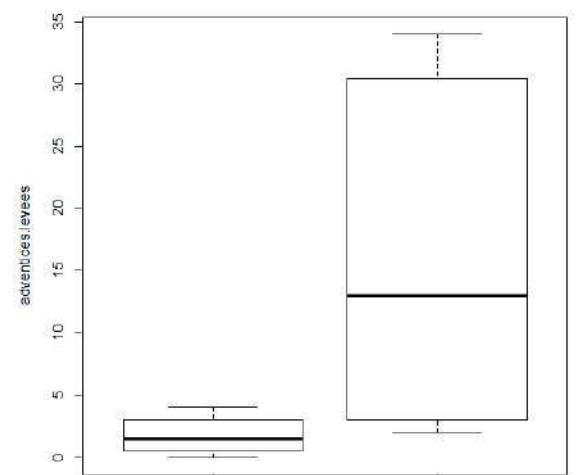


Figure 16 : Modèle de la console R et représentation des différences de levées d'adventices selon la taille des andains. Statistical model in R and boxplots of weeds raises depending on volumes.

b) Propriétés biologiques

Comme expliqué en première partie de ce rapport, le suivi de la température et le dépassement d'un nombre de jours au-dessus de valeurs seuils sont des conditions *sine qua non* à la certification d'un compost comme étant sain. Les effets des nombres de jours au-dessus des valeurs seuils sur les propriétés biologiques (présence d'adventices et phytotoxicité) sont étudiés dans cette partie.

Elimination d'individu aberrant

Dès l'observation des faux-semis et ainsi du salissement par les adventices, l'échantillon C2 est visuellement apparu comme largement plus sale que les autres, comme présenté sur les photographies des plaques alvéolées (figure 14). Lors du test Cresson, ce même échantillon a révélé des résultats très éloignés des autres qui ont pu être observés. De sérieux doutes pesaient déjà sur la bonne réalisation de la modalité C.

En effet, les retournements ont été réalisés majoritairement à l'aide du retourneur d'andain de la CUMA (Coopérative d'Utilisation du Matériel Agricole) Aff-et-Vilaine à l'exception de quelques-uns. Parmi les petits andains, seule la modalité C a été retournée au moyen du chargeur télescopique équipé d'un godet grappin (voir photos en annexe). Cela a été fait à deux reprises. La taille importante de la griffe relativement à celle des andains a rendu la manœuvre technique et difficile à réaliser. De la terre de surface des abords de l'andain a été arrachée et incorporée à ceux-là. La présence de touffe d'herbe fraîchement arrachée sur les andains en témoignait.

Les grands andains de la modalité E ont également connu deux retournements avec le matériel, mais leur volume plus important permettait de prendre une marge de sécurité et de ne pas y incorporer de terre de surface.

La visualisation de la répartition des valeurs à l'aide des boîtes de dispersion présentées en figure 15 indique très clairement un net écart entre cette modalité et l'ensemble des autres. Au vu de la manipulation hasardeuse de retournement et de son impact manifeste sur les résultats des test biologiques, le choix a été fait d'exclure l'échantillon C2 de cette analyse de données.

Analyses statistiques

Les différentes variables à expliquer sont les suivantes : taux de germination, taux de levée, taux de plantules viables, taux de plantules normales, nombre d'adventices levées. Les variables explicatives étudiées sont les nombres de jours au-dessus des valeurs seuils et la maturité du compost. Cette dernière est en fait indiquée par le facteur « taille ». En effet, les grands andains ont été mis en place cinq semaines plus tard que les petits, et ne sont pas censés être arrivés à pleine maturité au moment des analyses.

Concernant le salissement par les adventices, aucun effet significatif des durées au-dessus des différents seuils n'est à déplorer. Cependant il y a un effet significatif de la taille de l'andain, comme l'indique la figure 16 ci-contre. Bien qu'il n'ait pas pu être établi lors de cette expérience, on peut supposer que les liens entre tailles et températures aient joué un rôle dans ce « nettoyage » des adventices.

La présence de ces adventices dans une grande partie des échantillons est déplorable, mais la très forte diminution par rapport au produit antérieur est à considérer. Le plus sale des échantillons a en effet vu lever 34 plantules contre plus d'une soixantaine à la même période auparavant à volume équivalent (voir annexe biotests).

```
> anova(A, test="chi")
Analysis of Deviance Table
```

Model: quasipoisson, link: log

Response: taux_levee

Terms added sequentially (first to last)

	Df	Deviance	Resid. Df	Resid. Dev	Pr(>Chi)
NULL			10	6.4064	
`nb-jours.60`	1	2.3493	9	4.0571	0.02301 *

 signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```
> anova(A, test="chi")
Analysis of Deviance Table
```

Model: quasipoisson, link: log

Response: taux_levee

Terms added sequentially (first to last)

	Df	Deviance	Resid. Df	Resid. Dev	Pr(>Chi)
NULL			10	6.4064	
`nb-jours.65`	1	2.7401	9	3.6663	0.009735 **

 signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Figure 17 : impressions d'écran de la console R révélant un effet significatif de la durée au-dessus de seuils sur le taux de levée au test cresson. Screenshots of the R console revealing a significative effect of the duration above threshold values on the raising rate during cress test.

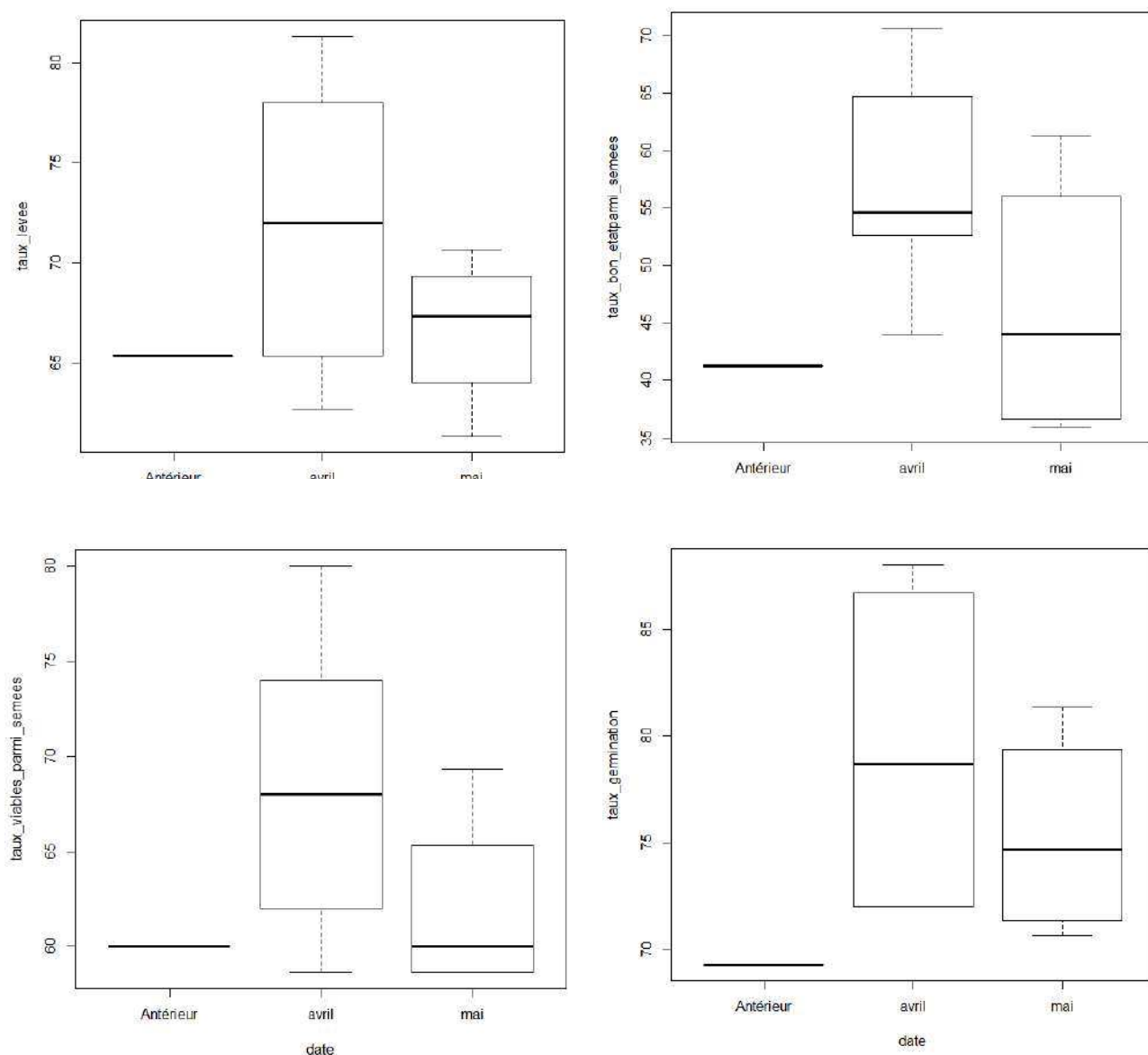


Figure 18 : Boîtes de dispersion des résultats au test cresson des composts classés par date de mise en place et comparés aux résultats du produit antérieur. Box plots of cress test results of the different composts, depending on their arrangement date and compared to the previous product.

Les tests cresson réalisés révèlent des différents moins avantageux pour les andains les plus volumineux. Les taux de levée sont bons, et permettent la mise en avant d'un effet positif nettement significatif des durées au-dessus de 60°C et 65°C sur la quantité de plantules de cresson levées. Cet effet est illustré par la figure 17 ci-contre qui présente les modèles obtenus dans la console du logiciel R.

S'il n'a pas été possible de mettre d'autres effet relatifs à la phytotoxicité en avant lors de cette expérience, une tendance important se remarque facilement grâce aux boîtes de dispersions présentées en figure 18. Chacune d'entre elle présente les résultats des petits andains, mis en place en avril, des gros mis en place en mai et ceux du produit réalisé avant que la mission ne prenne place. On remarque que pour chacun des paramètres : levée, germination, taux de platules viables et taux de plantules normales (en bon état), les andains réalisés en avril se répartissent sur de meilleures valeurs que ceux réalisés en mai. Ceci laisse penser que la maturité de ces derniers n'est pas encore totale au moment de la réalisation des tests, et que cela résulte en la présence de composés gênant le développement des plantes dans de bonnes conditions.

On remarque également que le produit réalisé antérieurement se trouve toujours parmi les valeurs les plus basses. Les procédés de compostages testés lors de la mission semblent donc produire un intrant de meilleure qualité biologique que celui réalisé auparavant ce qui est à vérifier par l'observation des qualités physico-chimiques des différents intrants.

2. Propriétés physico-chimiques

Une utilisation dans les champs du service agronomie de compost végétal produit à La Gacilly est envisageable sous réserve d'une amélioration de l'hygiénisation et des qualités biologiques du produit. Le cas échéant, ce compost aurait pour objectif de répondre aux besoins d'amélioration de la fertilité des sols agricole du groupe Rocher.

1) Porosité mesurée sur place

Un des principaux axes d'amélioration de la fertilité des sols agricoles de l'entreprise à La Gacilly est la rétention en eau du sol. Certaines plantes, comme l'arnica, ont en effet des besoins en eau important, entraînant la nécessité d'irriguer certaines parcelles. Alors que les phénomènes de sécheresses sont amenés à augmenter dans les prochaines années et décennies, un gain en résilience à ce sujet serait le bienvenu.

Les mesures de porosités effectuées au labo donnent un résultat de porosité $p\% = d_a/d_r \cdot 100$. Le tableau de calcul et de résultats est présenté en annexe. Cette valeur est de 73,05% pour le produit précédent.

Les produits de l'expérimentation donnent tous des valeurs comprises entre 75,3% et 78,51%. La variabilité intra-modalité étant plus élevée que la variabilité inter-modalité pour cette analyse, il est impossible d'en tirer un résultat statistique significatif.

2) Propriétés mesurées par Aurea

Les résultats détaillés de chacune des analyses effectuées par le laboratoire agréé sont présentés en annexe. Afin de faciliter la lisibilité des résultats, ceux-ci sont présentés dans la page suivante sous forme de graphiques radars. Dans un premier temps ils sont présentés de manière à pouvoir être visuellement comparés les uns par rapport aux autres. Ils sont ensuite présentés

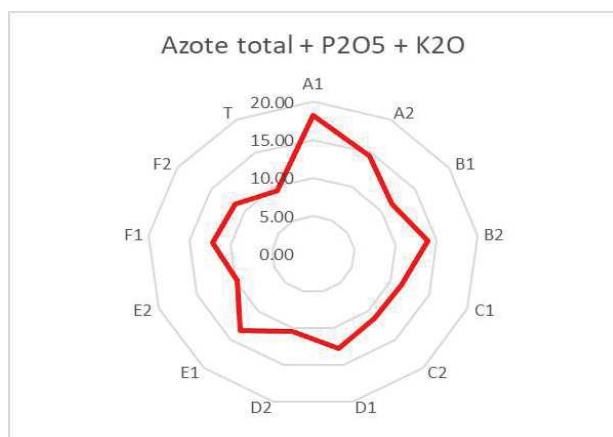
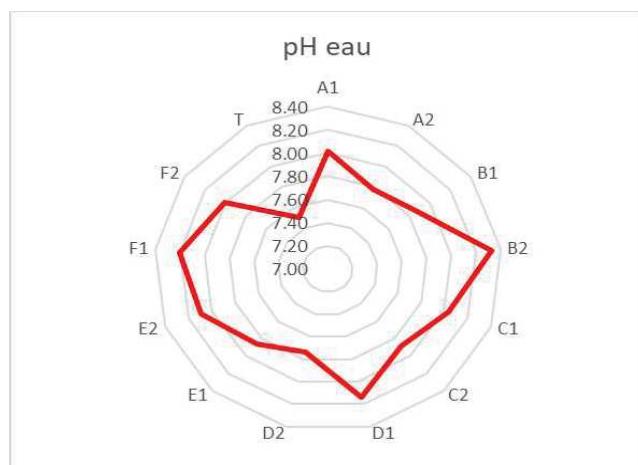
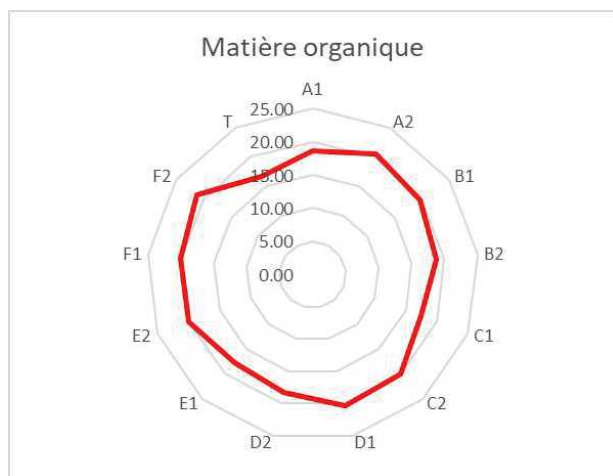
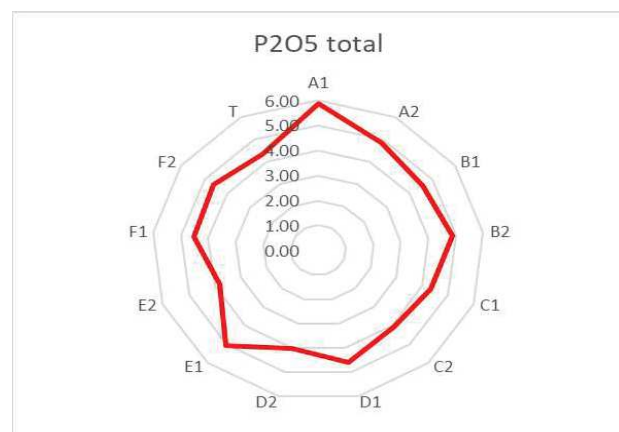
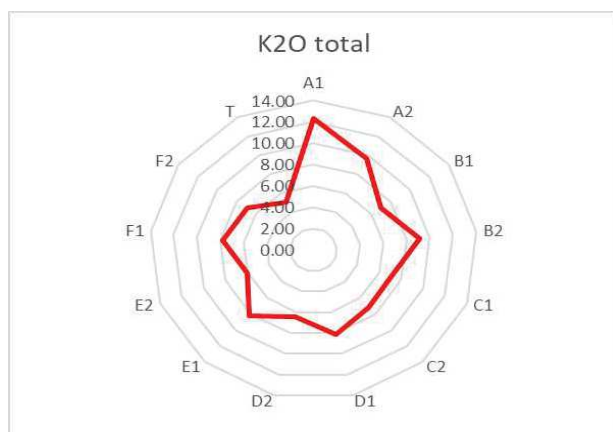
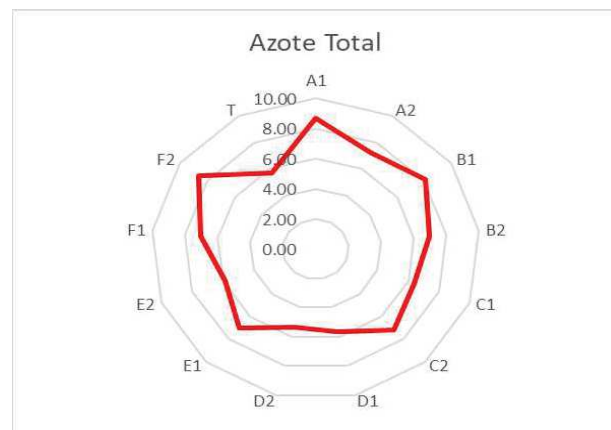
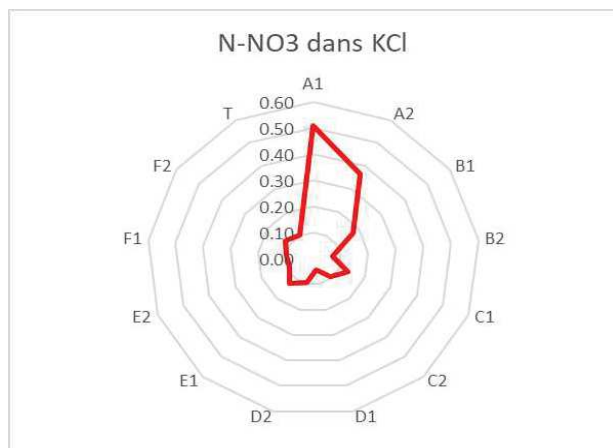


Figure 19 : Comparaison de caractéristiques et propriétés chimiques des composts les uns par rapport aux autres pour différentes. La lettre T représente le produit antérieur. Comparison of the different composts for different chemical properties. The letter T corresponds to the previous product

individuellement avec un graphique en radar toujours, afin de se faire une idée des éventuels atouts et inconvénients de chacun de ces produits.

La principale différence en terme chimique se fait assez logiquement entre la modalité A et les autres. A étant la seule modalité dont le mélange initial est composé à part égale de déchets verts frais et de déchets ligneux broyés. Cette composition initiale plus riche en énergie et en azote facilement mobilisables, l'azote y est bien plus présent sous forme de nitrate, facilement assimilable, que dans les autres modalités. La richesse en potassium du compost issu de ce mélange est également plus importante, mais la différence est moindre. Ces propriétés sont les seules où la différence est importante et notable entre les différentes modalités.

L'autre différence marquante se situe entre le produit antérieur et les différents composts réalisés au cours de la mission. Ces derniers sont légèrement plus riches dans la plupart des nutriments et présentent un pH plus élevé.

Afin de mieux se représenter les différences d'un produit à l'autre, ils ont chacun été représenté par un graphe de ce même style radar. Les valeurs ont été réduites et ramenées à une note comprise entre 0 et 20 pour se faire une meilleure idée de la variabilité d'un échantillon à l'autre. Cette représentation permet de réaliser l'importance de la variabilité intra-modalité et de comprendre pourquoi aucune autre tendance statistique que celles évoquées plus haut ne peut être tirée de cette expérience.

Le « profil » du produit précédent est en revanche plutôt parlant, et l'amélioration des qualités chimiques des composts comparés à celui-ci est évidente.

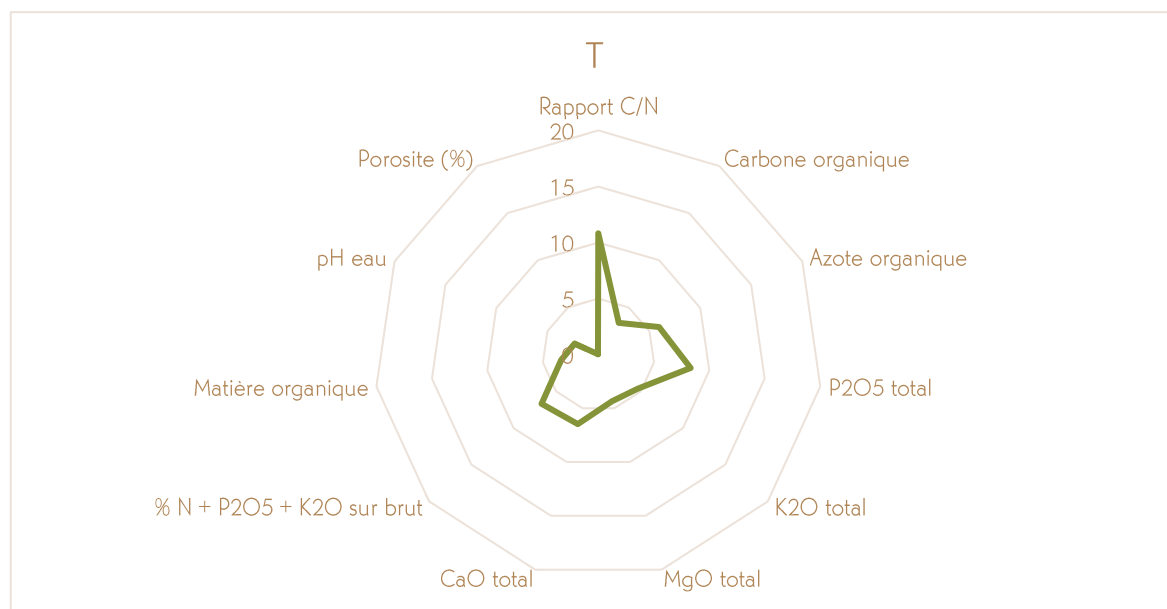
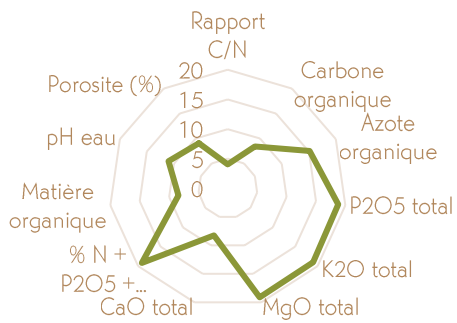


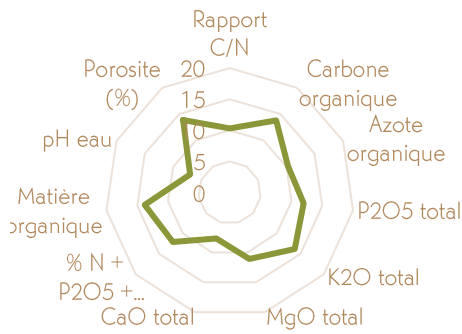
Figure 20 : Représentation sous forme de graphique radar des qualités chimiques du produit précédent comparé à ceux des composts réalisés au cours de la mission (page suivante).

Representation as a radar diagram of the chemical properties of the previous product compared to the composts realised during the mission (next page)

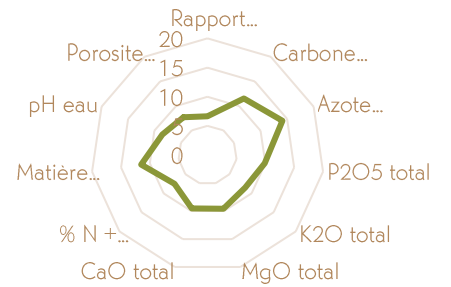
A1



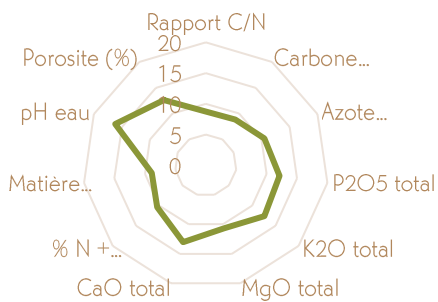
A2



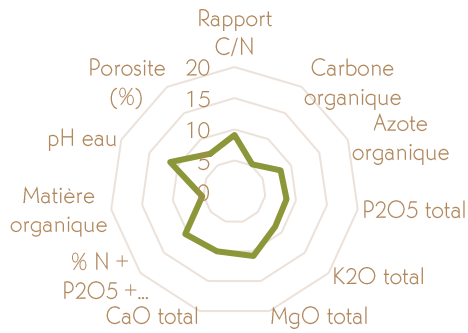
B1



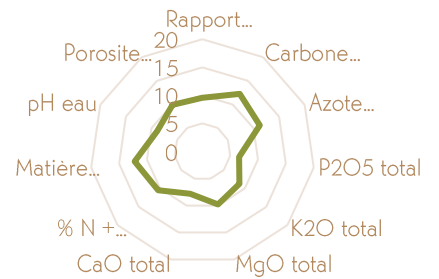
B2



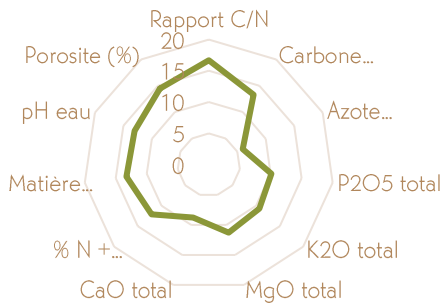
C1



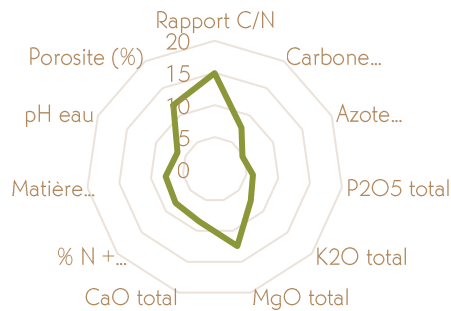
C2



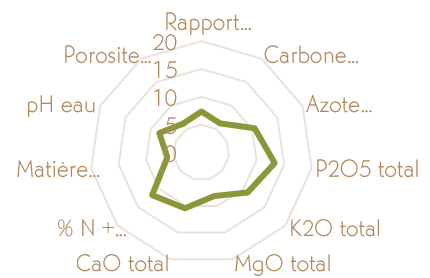
D1



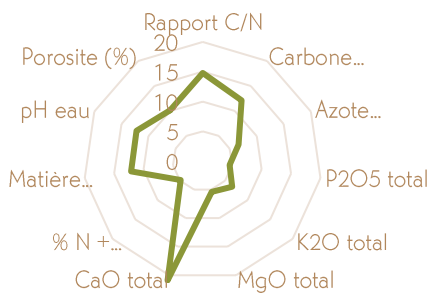
D2



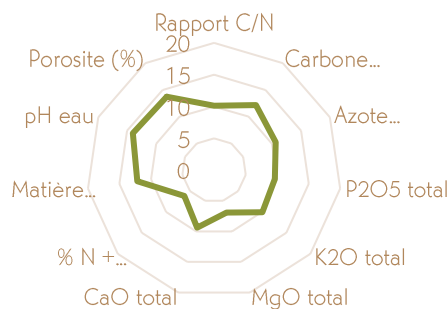
E1



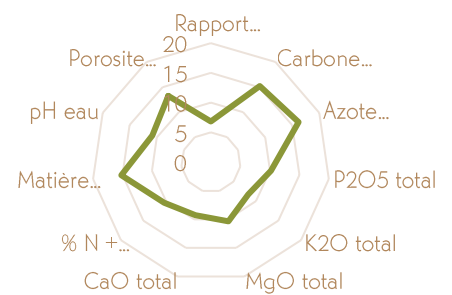
E2



F1



F2



3. Discussions

Le manque de répétitions des différentes modalités ne permet pas d'obtenir beaucoup d'effets significatifs à partir de l'expérimentation menée. Il aurait peut-être mieux fallu diminuer le nombre de paramètres initiaux pour avoir des effectifs plus importants de chaque modalité et renforcer les conclusions statistiques. On remarque également que les produits créés n'ont pas été bien hygiénisés à quelques exceptions près. L'amélioration des qualités biologiques du produit antérieur est réelle mais l'objectif initial d'un produit totalement propre n'a pas été atteint.

Cette expérience a néanmoins offert de solides indices sur les clés de la réussite de la production d'un intrant parfaitement hygiénisé. En effet il semble se dégager deux éléments importants qui permettront d'améliorer la qualité de l'intrant par rapport à ceux réalisés au cours de la mission : une taille d'andain suffisante est souhaitable, et une composition initiale plus riche en énergie et en azote facilement dégradable par les microorganismes.

Les andains expérimentaux étaient trop petits, la surface d'échange avec l'air était trop importante relativement au volume de MO à dégrader pour permettre une montée en température suffisante en cœur d'andain. Les andains plus volumineux, réalisés dans un second temps ont présenté un salissement plus faible. La durée de décomposition a malheureusement été trop courte pour permettre d'atteindre une maturité satisfaisante limitant les problèmes de phytotoxicité. Ce problème est spécifique au contexte de recherche, où il a fallu multiplier les andains sur une surface limitée. En condition d'exploitation, les andains seront normalement suffisamment volumineux pour que ce point ne soit plus problématique.

Avoir une composition initiale plus riche en déchets verts frais facilement fermentescibles semble également faciliter la montée en température du tas en début de décomposition. L'expert de la FiBL suggère d'ailleurs que de la poudre de corne peut être ajoutée à la composition initiale si les ligneux sont majoritaires. Cette poudre est en effet riche en azote facilement mobilisable par les microorganismes et peut aider au bon démarrage du processus. L'évolution prochaine qualitative et quantitative des composés initiaux devrait cependant suffire.

4. Une hausse qualitative et quantitative des entrants

Les produits compostables au sein du groupe vont augmenter dans les prochains mois, ce qui est une bonne nouvelle tant pour la réduction des déchets que pour l'amélioration de la fertilisation agronomique. Ces évolutions ont plusieurs causes. L'évolution de la réglementation des producteurs de biodéchets évoquée dans la première partie de ce rapport s'applique à présent au restaurant d'entreprise d'Yves Rocher à La Gacilly. Avec une production de biodéchets d'environ 15 tonnes l'année dernière, le restaurant dépasse en effet le seuil légal de 10t de biodéchets générés, obligeant à un traitement de ces déchets. Si les déchets alimentaires transformés peuvent générer de nombreux problèmes en matière de compostage, les épluchures pures présentent au contraire des atouts intéressants. Celles-ci sont riches en nutriments et en énergie rapidement décomposables. Des rencontres avec les services généraux de l'entreprise et les responsables du restaurant ont débouché sur l'incorporation des déchets alimentaires non transformés, générés en amont des repas (épluchures et fruits/légumes inconsommables) au processus à partir de juin 2019.

La mise en service en 2020 de l'atelier de production d'hydrolats va permettre l'apport régulier d'autres déchets verts intéressants du point de vue énergétique et nutritif. De plus, cet intrant sera très humide, ce qui permet de limiter les besoins en irrigations des andains.



Figure 21 : exemple de cribleuse à compost végétal. Example of grain sifter for vegetal compost. (http://www.hantsch.fr/wp-content/uploads/2012/05/Joker_300dpi_1.jpg)

A cela s'ajoute la mise en commun de la gestion des déchets verts avec l'éco-hôtel de La Grée des Landes et de l'exploitation forestière de la Grée des Landes.

La production de compost devrait ainsi doubler dans les mois qui viennent pour atteindre une quantité comprise entre 180 et 220 tonnes de produit mûr par année, avec une part de déchets verts qui devrait passer de 40 à 55%.

IV. Quelles évolutions ?

Le système va donc connaître des évolutions, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle cette mission a été proposée. Dans cette partie, les évolutions se présentent sous la forme de proposition chiffrées avec une fourchette haute et une fourchette basse, selon l'option choisie. La première catégorie est constituée des évolutions non-optionnelles, qui doivent impérativement être apportées et sur lesquels il n'y a pas ou peu de choix à faire. Dans la deuxième partie, deux choix sont proposés pour différentes étapes du processus de compostage.

A quelques semaines de la fin de la mission, l'acquisition prochaine d'un nouveau corps de ferme par le Groupe Rocher a été validée. Celui-ci est situé à 7km de La Villouët, et 5,8 km du siège, sur la commune des Fougerets. Bien que la mise en place d'une station de compostage ne soit pas la raison principale de cette acquisition, celle-ci va permettre d'accueillir cette station.

En effet, une station en bonne et due forme doit être équipée d'un dispositif de collecte des lixiviats, et un sol étanche à l'environnement alentour permet de limiter les risques de contamination et/ou salissement du compost par des champignons et adventices. Or, la Villouët est un lieu classé refuge LPO, chaque aménagement sur ce terrain ne peut être obtenu qu'après un long et fastidieux travail administratif et la bétonisation d'une partie du sol de ce lieu semblait inenvisageable. Ce nouveau corps de ferme est conçu pour un élevage de vache laitière, une partie du sol est déjà artificialisée et ne trouve pas de raison d'usage particulière pour Yves Rocher. Ceci est donc une aubaine pour la mise en place de la station de compostage.

1. Les évolutions non-optionnelles

L'aménagement d'un système de récupération de lixiviats faisait partie de ces évolutions obligatoires, mais la solution est donc déjà trouvée.

1. Tri du plastique

Une réelle évolution doit avoir lieu par rapport à la problématique des plastiques dans les déchets organiques. Le levier est avant tout une bonne sensibilisation des différents collaborateurs à ce problème. Ce travail de sensibilisation a été réalisé au cours du stage et ne devrait pas représenter de coût supplémentaire si les consignes sont respectées.

2. Criblage du produit

Un compost, même mûr, comporte toujours des éléments grossiers qu'il est important de trier pour faciliter l'usage. Ces éléments grossiers sont ensuite réintégrés dans la boucle, comme éléments constitutifs des prochains andains. Cette action présente l'avantage d'ensemencer dès le début le nouveau tas de compost en souches d'organismes décomposeurs, et d'assurer une bonne circulation d'air dans les andains nouvellement formés.



Figure 22 : vue satellite de la ferme de La Marandais, aux Fougerets. L'ancienne stabulation, située au centre de l'image permettra de disposer les andains sur une surface protégée des intempéries et déjà équipée d'un dispositif de récupération des lixiviats. Satellite view of the farm of La Marandais, in Les Fougerets. The old stabling, in the centre of the picture will allow to arrange the windrow on a rain protected surface, already able to collect leaching.

Tableau 5 : Estimation des charges annuelles de la sous-traitance du broyage. Estimation of the annual cost of subcontracting wood shredding.

Charge	Montant
Opérationnelle interne	203 €
Achat de service	2000,00 €
TOTAL	2203 €

Le criblage d'un compost à usage horticole se fait avec une maille plus petite que celui d'un compost épandu au champs (15mm contre 60mm). L'achat d'une cribleuse est à exclure au vu de l'important investissement que cela représente. La société *Théaud Végétaux* propose ce service sur les sites de production de compost. Le débit de chantier d'un criblage fin à destination horticole est plus réduit que celui d'un criblage plus grossier. Le prix annuel du criblage (un à deux chantiers par an maximum) varierait selon la maille choisie entre environ 1'200 et 2'100€ H.T. L'argent dépensé est en partie récupéré pour un usage horticole, car il permet d'améliorer l'efficacité d'usage du produit. La problématique des nombreux éléments trop grossiers présents dans le compost est une des principales à avoir été soulevée par les utilisateurs.

2. Des choix à faire

Cette ultime partie du rapport est constituée de propositions d'évolutions des processus de compostage. Pour chaque étape du parcours des déchets organiques, un ou deux exemples d'amélioration sont présentés et chiffrés.

1. Processus de mise en place et suivi du compostage

Le processus de mise en place doit connaître un changement important qui n'est pas coûteux : il s'agit de la planification de la mise en place des andains. Les ligneux, qu'ils soient broyés ou non peuvent rester stocker longtemps en restant plutôt stable, mais ce n'est pas le cas des déchets verts frais, des épluchures et des plantes mouillées sortant de l'unité de production d'hydrolat. Ces intrants à fort pouvoir fermentescible doivent idéalement être placés en andains dans les six semaines qui suivent leur récolte. Mais cette organisation dépend des choix effectués en terme dispositif de compostage aux différentes étapes, du broyage du bois à la mise en place et la gestion des andains.

2. Broyage des ligneux

Avant la mission, le broyage des déchets ligneux de La Croix des Archers est effectué environ une fois par an, par le prestataire Armorique Forêt équipé d'un broyeur à fléaux, pour un montant d'approximativement 1'000€. Ceux des déchets ligneux de l'éco-hôtel *La Grée des Landes* et de la propriété de *La Forêt Neuve* sont également faits une fois par an, avec la société Arz Elagage, pour environ 900€ chacun. Ces derniers sont généralement effectués par un broyeur à couteaux. Comme indiqué précédemment, le broyage à couteaux n'est pas recommandé pour permettre un bon compostage du bois. Les deux pistes d'amélioration sont les suivantes :

a) Mutualisation de la sous-traitance du broyage

La première solution ne requiert pas d'investissement particulier, cela consiste simplement à réunir en un même lieu l'ensemble des ligneux à broyer, et de mutualiser la prestation de broyage. Cela demande d'assurer la logistique du transport de bois avant broyage et éventuellement après. Le temps requis est estimé à 6 heures, ce qui représente un coût total (matériel + main d'œuvre) d'environ 200€, auquel il faut ajouter un coût de prestation d'approximativement 2'000€.

Les coûts sont résumés dans le tableau 5, le détail est présenté en annexe.

Avantages : Pas besoin d'entretenir de matériel. Mobilisation de la main d'œuvre plutôt faible.

Inconvénients : Dépend de la disponibilité du sous-traitant. Prix élevé. Pas de marge de manœuvre sur la finesse du broyage. Estimation faite pour un broyage annuel, demande une bonne organisation pour tout effectuer en une fois



Figure 23 : Broyeur forestier suggéré pour la proposition d'investissement.
Suggested wood chipper to purchase.

Tableau 6 : Estimation des coûts annuels de broyage en cas d'acquisition d'un broyeur forestier. Estimation of the cost inducedd by the purchase of a wood chipper.

Tâche	Coût matériel	Coût Main d'Œuvre	Coût total tâche
Transport du bois	34,19 €	67,12 €	101 €
Broyage	1450,43 €	536,98 €	1987 €
		Total	2088 €

Tableau 7 : Résumé des estimations de coûts annuels d'une aération au retourneur d'andain acheté neuf, pour un Gujer TG-301, les détails sont présentés en annexe.
Summary of the estimated anual costs of a compost reverser TG-301 purchase

Tâche	Coût matériel	Coût Main d'Œuvre	Coût total tâche
Mise en place	69,80 €	178,99 €	249 €
Retournement	3878,39 €	357,98 €	4236 €
		Total	4485 €

b) Achat d'un broyeur

Cette solution consiste à investir dans l'achat d'un broyeur forestier à marteaux, qui fonctionne sur la prise de force d'un tracteur de 125cv. Le prix d'achat est basé sur un devis effectué en avril 2019, le coût du matériel est calculé sur une durée d'amortissement de 8 ans, qui est la durée systématiquement choisie par le groupe pour l'amortissement du matériel agricole. Ce broyeur étant plus modeste celui du prestataire évoqué dans la partie précédente, le temps consacré au broyage est supérieur (l'estimation choisie pour le calcul est de trois fois plus de temps requis, ce qui est une estimation haute de la durée). Le fait de pouvoir se déplacer directement avec le broyeur sur les différents lieux de stockage de bois permet de limiter le nombre de transports à effectuer. En effet, Une fois broyé le volume du bois réduit considérablement, permettant de limiter le nombre de déplacements à effectuer.

Le tableau 6 présente le résumé du coût annualisé de cette proposition, le détail est présenté en annexe. On remarque un coût similaire à la sous-traitance, bien que légèrement inférieur.

Avantages : Réalisation du broyage au moment souhaité. Choix plus facile de la finesse du broyage (en repassant plusieurs fois aux endroits avec un broyage jugé trop grossier). Coût calculé sur la base d'un amortissement en 8 ans, mais le matériel devrait pouvoir durer plus longtemps, cette solution serait alors économiquement nettement plus avantageuse que la précédente sur le long terme. Maîtrise totale du process en interne.

Inconvénients : Entretien du matériel à réaliser. Mobilisation de main d'œuvre.

3) Aménagement de la plateforme et maîtrise du compostage :

Ce choix est déterminant à réaliser, il s'agit d'un des principaux sujets de l'étude de ce rapport. Les deux options étudiées ici sont l'achat d'un retourneur d'andain et celle d'un « casier de fermentation aérobie » qui est un dispositif de ventilation forcée. La possibilité de sous-traiter cette tâche à la CUMA a été écartée au cours de la mission. En effet, cette option avait dans un premier temps été choisie pour l'expérimentation, avant d'être écartée. Le problème étant l'importante dépendance qu'elle engendre, il n'y a aucune flexibilité sur les dates de passage. Le rythme de retournement est d'une fois toutes les trois semaines, et n'a lieu qu'au printemps et à l'automne. Dans le cadre de l'expérimentation, il a été souhaité que le rythme soit modifié et que les dates soient planifiées à l'avance, mais la CUMA effectuait des semis de maïs à la même période et priorisait largement cette activité à celle du retournement d'andain.

a) Retourneur d'andain

Une large gamme de retourneurs d'andain existe aujourd'hui, le choix a été fait de se concentrer sur le modèle *Gujer TG-301*. Celui-ci semble en effet adapté aux volumes à composter par le groupe. Il présente l'avantage de pouvoir être équipé d'une citerne et d'une rampe d'arrosage, et d'un guide-bâche (voir figure 24). Cela permet de diminuer la durée de travail nécessaire. Il peut être entraîné par un tracteur entre 65 et 130cv, cette puissance correspond à celle développée par les tracteurs utilisés chez Yves Rocher. Le devis pour un outil neuf a été demandé et est présenté en annexe, c'est sur ce prix-là, amorti sur 8 ans également qu'est calculé le coût annuel. Il est à noter qu'il est possible d'en trouver d'occasion. Il aurait été possible pour le groupe d'acquérir ce modèle en juin 2019, avec pour simple dépense à effectuer une importation du matériel depuis la Suisse (qui aurait coûté environ 2500€). La gestion des investissements au sein du groupe nécessite cependant un long travail en amont et ne permet pas d'être réactif sur ce genre d'aubaine.



Figure 24 : Le retourneur d'andain Gujer TG-301 équipé d'un guide-bâche et d'une rampe d'arrosage en fonctionnement serait bien adapté aux besoins du groupe Rocher. The compost reverser Gujer TG-301 equipped with a tarp leader and an irrigation device corresponds to the needs.

Tableau 8 : Résumé des estimations de coûts annuels d'une aération en casier de fermentation aérobie, les détails sont présentés en annexe. Summary of the annual costs of an aeration through an automatically managed forced ventilation system.

Tâche	Coût matériel	Coût Main d'Œuvre	Coût total tâche
Chargement / déchargement	551,60 €	929,86 €	1481 €
Ventilation	4573,00 €	0	4573 €
		Total	6054 €

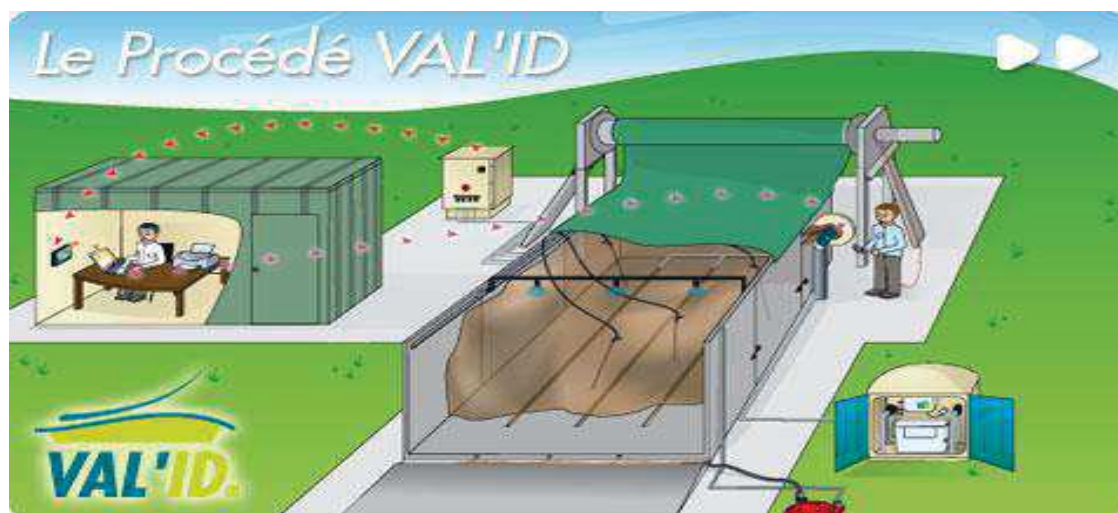


Figure 25 : illustration représentant une station de compostage en ventilation forcée. Scheme of a forced ventilation composting station.

Avantages : compost plus homogène. Possibilité de diminuer nettement les coûts en acquérant du matériel d'occasion. Moins d'éléments grossiers dans le produit fini.

Inconvénients : Temps nécessaire important. Entretien du matériel (nombreuses pièces d'usures travaillées lors du retournement). Espace nécessaire important (manœuvres d'engins agricoles et taille limitée des andains).

b) Ventilation forcée

L'installation d'un dispositif de ventilation forcée est une solution envisageable. Bien entretenu, ce dispositif peut durer au moins 15 ans, mais le choix est fait d'une durée d'amortissement de 10 ans, pour permettre une marge de sécurité. Ce dispositif est plus coûteux, mais permet le recyclage d'un plus grand nombre de biodéchets par unité de surface de la plateforme, et une maîtrise plus grande du processus. Longtemps étudié comme la solution la plus envisageable, celle-ci a néanmoins perdu en intérêt avec l'acquisition du nouveau corps de ferme. En effet, l'espace limité de La Villouët semblait difficilement en mesure de permettre le compostage de l'ensemble des déchets verts à recycler, mais les nombreux espaces bétonnés et couverts de La Marandais redistribuent les cartes de cette problématique d'espace. Le brassage est effectué lors du chargement / déchargement du casier, en utilisant un épandeur à fumier pour apporter les matières à composter et lors de la sortie du casier, pour les placer dans l'espace de stockage. Le coût de la main d'œuvre est ramené à zéro sur la tâche de ventilation, le temps nécessaire au bon nettoyage du casier et des gaines est inclus au temps de chargement / déchargement.

Avantages : Plus grand volume de déchets recyclé par unité de surface de la station. Facilitation de la maîtrise et du suivi du processus. Temps de travail nécessaire plus faible.

Inconvénients : Compost moins homogène. Coûts plus élevés.

Il est à noter que le principal intérêt de ce système est le suivi automatique et régulier des températures. Il est cependant possible d'installer un système de thermomètres connectés y compris sur un fonctionnement en retournement d'andain, en retirant bien évidemment les thermomètres au préalable

Conclusion

Cette mission au sein de l'entreprise Yves Rocher a permis un large balayage des problématiques liées au compostage. Il s'agit bel et bien d'une pratique d'avenir, qui répond à différents besoins, qu'il s'agisse de valorisation de déchets ou d'amélioration de l'autonomie en intrants. Ces processus vertueux trouveront aisément leur place à l'interface des services agronomie et botanique.

L'expérimentation conduite n'a certes pas permis d'obtenir de nombreux résultats significatifs, mais elle indique des tendances qui seront à confirmer lors de la phase transition des procédés de valorisation des déchets verts. Il n'était pas possible de faire tenir dans ce rapport une liste exhaustive de l'ensemble des méthodes existantes pour le compostage, seules les plus adaptées au contexte précis de l'entreprise ont ici été retenues.

Des choix restent à faire tant concernant les moyens investis pour cette activité que les débouchés qu'elle aura. La phase de transition et de mise en place en conditions d'exploitation aura un rôle clé dans la réalisation de ces choix. Ces derniers impacteront le produit obtenu, et ses bénéfices à courts, moyens et longs termes. D'eux dépendra la qualité du produit obtenu et de cette qualité dépendront l'intérêt économique de cette activité de compostage. Si les coûts associés vont nécessairement augmenter par rapport à ce qui se faisait précédemment, d'autres pourront être évités, mais sont aujourd'hui très difficile à estimer. La charge en intrants va ainsi diminuer, qu'il s'agisse de terreau pour le service botanique, pour les semis sous serre du service agronomie ou bien d'engrais pour les parcelles de production agricole. L'amélioration de la résilience du système se révélera probablement bénéfique à moyen et long terme, mais chiffrer cela, dans le contexte de production particulier de l'entreprise est aujourd'hui impossible. D'autant que ce développement et la mise en valeur de la production agroécologique par l'entreprise peut avoir un impact difficilement chiffrable en termes de communication et d'image de marque

Références

Bibliographie

Abujabhah Ibrahim, Bound Sally, Doyle Richard et Bowman John ; 2015. Effects of biochar and compost amendments on soil physico-chemical properties and the total community within a temperate agricultural soil. In : *Applied Soil Ecology*. Vol. 98. p. 243-253.

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Audit des plates-formes de compostage de déchets organiques en France avec analyses de composts, d'eau de ruissellement et bilan des aides ADEME au compostage des déchets verts. France. ADEME. 2007. 112 p. disponible à l'adresse : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/audit_plates_formes_de_compostage.pdf. [Consulté le 10 mai 2019].

Bonanomi Giuliano, Antignani Vincenzo, Pane C. et Scala Felice, 2007. Suppression of soilborne fungal diseases with organic amendments. In : *Journal of plant pathology*. Vol. 89 (3). p. 311-324

Bossuyt H, Deneef Karolien, Frey Serita, Merckx Roel et Paustian Keith, 2001. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. In : *Applied Soil Ecology*. Vol. 16 (3) p.195-208

Costerton J.W., Lewandowski Zbigniew, Debeer D, Caldwell Douglas, Korber Darren et Ga James, 1994. Biofilms, the customized microniche. In : *Journal of bacteriology*. Vol. 176(8). p. 2137-2142

Cuijpers W.J.M., Koopmans C.J. et Erisman Jan Willem. Building on resilience principles for sustainable agriculture : a draft framework. Netherlands. Louis Bolk Institute, 2014. 47 pp.

Fuchs Jacques, Berner Alfred, Mayer Jochen, Smidt Ena et Schleiss Konrad, 2008. Influence of compost and digestates on plant growth and health: Potentials and limits. In : *Proceedings of the international congress CODIS 2008*, Research institute of organic agriculture. CH-Frick. p. 101-110. Disponible à l'adresse : <http://orgprints.org/17977> [Consulté le 13 mai 2019]

Fuchs Jacques, 2004. Aération active des tas de composts: bases, chances et risques. FIBL/Biophyt (document interne) 72p.

Insam H. et De Bertoldi M., 2007. Chapter 3 Microbiology of the composting process. In : *Waste Management Series*. Vol 8. p. 25-48.

Kluge Rainer, 2001. Fertilisation effect of the P and K supply with composts. In : *Applying compost benefits and needs - Seminar Proceedings* 22 novembre 2001. p. 139-140. Disponible à l'adresse : https://ec.europa.eu/environment/archives/waste/pdf_comments/040119_proceedings.pdf [consulté le 9 mai 2019]

Rawat Seema et Narain Johri Bhavdish, 2013. Role of Thermophilic Microflora in Composting. In : *Thermophilic microbes in environmental and industrial biotechnology: biotechnology of thermophiles*. p. 137-169.

Ryckeboer Jaak, Mergaert J, Vaes K, Klammer S, De Clercq Deborah, Coosemans J, Insam Heribert et Swings Jean, 2003. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. In : *Annals of Microbiology* 53(4). P. 349-410

Ten Napel Jan, Bianchi Felix et Bestman M.W.P., 2006. Utilising intrinsic robustness in agricultural production systems. In : *TransForum Agro & Groen - Working papers* p. 32-53

Van Der Wurff André, Fuchs Jacques, Raviv Michael et Termorshuizen Aad, 2016. Handbook for composting and compost use in organic horticulture. European Union. BioGreenHouse. 2016. 106 pp. disponible à l'adresse : <http://orgprints.org/30598/> [consulté le 15 mai 2019]

Yazdanpanah Najme, Mahmoodababi Majid et Cerdà Artemi, 2015. The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands. In : *Geoderma*. Vol. 266. p. 58-65

Zaborowska Magdalena, Wozny Grzegorz, Wyszowska Jadwiga et Kucharski Jan, 2018. Biostimulation of the activity of microorganisms and soil enzymes through fertilisation with composts. In : *Soil Research*. Vol. 56(7). p. 735-748. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/328387574_Biostimulation_of_the_activity_of_microorganisms_and_soil_enzymes_through_fertilisation_with_composts [consulté le 15 mai 2019]

Sitographie

Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2016. Rejoignez l'initiative 4 pour 1000, les sols pour la sécurité alimentaire et le climat. Disponible à l'adresse : <https://www.4p1000.org/sites/default/files/content/fr-4pour1000-8pages.pdf> [Consulté le 11 juillet 2019]

Misra R.V., Roy R.N. et Hiraoka H., 2005. Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole. FAO.. Disponible à l'adresse : <http://www.fao.org/3/y5104f/y5104f05.htm> [Consulté le 15 juillet 2019]

Van Der Wurff André, Janse J., Kok C.J. et Zoon F.C., 2010. Biological control of root knot nematodes in organic vegetable and flower greenhouse cultivation. Wageningen UR Greenhouse Horticulture. Disponible à l'adresse : <http://edepot.wur.nl/154456> [Consulté le 12 juillet 2019]

Ministère de la transition écologique et solidaire, 2017. Biodéchets. Disponible à l'adresse : <http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biodechets> [Consulté le 5 août 2019]

Table des annexes

1. Report: technoeconomic analysis of vegetal composting processes aiming at an agronomic valorisation of green waste
2. Les obligations des gros producteurs de biodéchets. Direction Générale de la prévention des risques
3. Résultats et feuille de calcul des mesures de porosités
4. Biotests : résultats des tests cresson et des levées d'adventices au faux-semis
5. Photographies du dispositif expérimental et du gros matériel utilisé
6. Relevés des températures
7. Résultats des analyses du laboratoire Auréa
8. Coûts d'utilisation du matériel et de la main d'œuvre du service agronomie
9. Feuille de calcul des coûts des propositions de systèmes de broyage
10. Feuille de calcul des coûts des propositions de systèmes d'aération

Report : technoeconomic analysis of vegetal composting processes aiming an agronomic valorisation of green waste

1. Introduction

The mission took place in La Gacilly, Brittany, France, from February to August 2019. The concerned company is Yves Rocher, a multinational cosmetic company. The brand is very linked to plants & vegetal production and patented the term of botanical beauty®. Most of the products contain at least one vegetal sourced component.

The company develops a strategy of ethical sourcing of these components, producing those which can be grown in Brittany, next to the Head Quarters in an organic way of farming, and buying the other vegetal materials through sustainable production sectors. The agronomy department oversees flowers productions and receipts.

In order to spread information and messages, there is also a botanical garden next to the Head Quarters. This garden contains more than 1'000 vegetal species and is visited by thousands of people every years. The botanic department is in charge of this garden, as well as the management of every green spaces around the factories, headquarter and logistics centres in La Gacilly.

The agronomy and botanic departments have strong links and services pooling. One of them is the management of green waste. Indeed, the management of these fields, greenspaces and garden generates a lot of them. The installation of a hydrolat production (distilled plant water) in the next months will result in the augmentation of compostable by-products to manage. Moreover, the threshold of organic waste level inducing an obligatory valorisation went down to 10t nowadays and the restaurant for employees produces about 15t of organic waste. There is a strong will of improving the environmental impacts of the company, and a will of improve the soil of the plant production fields.

2. Bibliography of composting

Some processes recently studied

Humanity may produce some kinds of compost since centuries, the scientific knowledge about these products have been discovered in the past decades. A century ago, most of the people didn't know that the organic matter degradation is the result of biological activity done by microorganisms. After this discovery, the three main drivers of the process were guessed and confirmed by studies: food, moisture and temperature. Indeed, the composition of the starting mixture is a key point. It must be rich enough and balanced to permit a quick development of microorganisms' exothermic metabolisms. The first mesophilus stage is quite short. The heat increasing is as much an indicator and a driver of the composting process. Within a few days, the temperature rich 60°C or more. It results in a selection of the thermophilus bacteria.

At this moment two main phenomena occur: some chemical important molecules degradations, and what is called hygienisation: death of weeds seeds and plant diseases. This is a very sensitive part of the process which must be well monitored. In order to be clean, the compost

must spend at least 3 weeks above 55°C or 1 week above 65°C. Temperature has to be checked regularly (every 2 or 3 days at least) to ensure that this phase last for a long enough duration.

This phase can be critical and often need some monitoring: if the temperature exceeds 70°C, add some water is important to cool down the windrow and avoid killing many needed microorganisms and unbalanced the microbiota. In the contrary, if the temperature dips under 60°C, it is important to relaunch the biological activity by an oxygenation. It can be done by mixing the pile to let air get in or by a ventilation system. Ventilation systems need big investments and Mixing systems can be labour intensive. Even in a ventilation system it is important to mix the mixture at least once to ensure a good homogeneity of the product. Moisture of the mixture monitoring is also crucial, the “fist test” must be done at least once a week.

After this thermophilus phase, there is a cooling phase and maturing phase which are longer, and it correspond to a slow cooling down of the pile until it reaches the ambient temperature. Moisture still need to be checked but it is less critical during these phases than the previous one.

An agroecological input

The use of compost in fields and greenhouses has been proven to present many benefits, especially in organic farming. Indeed, compost is good for the biodiversity of the soil, which enhance the resilience of the agrosystem. Moreover, it can positively influence defence reactions of crops to soilborne diseases. Finally, it plays an important role in carbon storage in soils, so it will become more and more important in the next years.

By the way, its development is faster and faster will continue. In many countries such as France, the valorisation of organic wastes becomes obligatory, the machinery to do it is improving and the knowledge about it is spreading.

3. Initial situation

Process

Before the mission, the green wastes were managed through the prism of time optimisation. Indeed, the workers are very busy and had other priorities than managing this. Different enclosed storage facilities were used. In one of them the woody wastes were store for approximatively one year. Once the facility full, the wood chipping was subcontracted. The chipped wood was then transfer to another storage. Grass cuttings were stored in the same facility but next to it. There were mixed after one year, when they were moved into the next storage facility, some sand was added. Just after mixing all of this, a hermetic tarp was put on the pile. It remained for one more year in this situation. Afterward, some earth was added, and it was mixed again before to be put under another tarp in the last storage facility. When the botanic department needed it, this product was used.

Properties

The previous product was used but was not very satisfying for its users. The main critics focused on the coarse elements. Some big pieces of wood, but also many plastics. Among the critics, another was the weeds presence and that it became very hard after being watered. To measure the weeds seeds content, a false seed bed was done and regularly watched, to count the number of weeds raises and estimate the seeds stocks of the product. A cress test was also

realised to have an idea of the phytotoxicity. This plant has the property to raise very quick and to express viewable symptoms of bad development in the presence of diseases or pollutants. A sample of approximatively 12L of has been used for the false seed bed, it results in more than 400 plantlets raising, showing a very high seed content into it. The healthy cress plantlets rate after 7 days was 40%. It can be the expression of a plant inhibiting molecules or organisms.

The visible bad quality of this produce and the need of a better valuation induced by increasing quantity of compostable wastes to recycle lead to a will of improvement from the company.

4. Improvement possibilities

As there are many different systems of good composting, improving the current one is a reachable objective. First it appears to be very long to obtain a bad quality product: nearly three years when the literature evokes a 3 to 6 months duration. An experimentation took place during the mission aiming at a better-quality compost obtained in a 4 months length of time.

Description of the experimentation

Different "composting recipes" has been tried. All of them in a windrow shape, which appears to be more efficient. First, 4 different types of composting methods were tested, with two piles each. Oxygenation of the windrow is a key point for a good composting process and an obvious way to improve the compost quality and decrease the decomposition time. 2 recipes of the experimentations were oxygenated by a "Do it yourself" ventilation system. A pipe was partly buried and drilled in many different places. Some windrows were places on the pipe, and some air was breathed in using a blower 3 to 5 times a week during 10 to 20 min. Some other windrows were place so they could be reversed with a windrow reverser or a tractor to be oxygenated. Two rhythms of windrow reversing were tested. The starting mixture was also tested as a parameter, one of the ventilated "recipes" was composed of 2/3 wood and 1/3 fresh green waste (such as grass cuttings) and the other was a 50/50 composition. After 5 weeks, the windrows appeared to be probably to small to have a good hygienisation. Two recipes were repeated with a bigger volume (ventilated 2/3 - 1/3 and one of the two reversed ones).

It resulted in 6 different types, with 2 repetitions each. 3 to 5 times a week, from April to August, the temperature of each windrow was measured in three different places, with at least 25 cm of depth, and the mean was calculated. At the end of the mission, some samples were made for each in order to make some analysis. The weeds seeds stock has been observed, such as phytotoxicity through a Cress Test. Somme physical and chemical analysis have been made by a certified laboratory

Results

The small number of repetitions and samples made resulted in a difficulty to enlighten significative effects. Nevertheless, it's been showed that the size of the windrow has a positive effect on the number of days above the tresholds values of 60°C and 65°C. These values also significantly improve the raising rates during the cress test. The composition with equal proportion of grass cuttings and woodchips seems to increase the number of days above threshold values, so does the chemical composition (N-NO₃rate or K₂O), but the tendencies are not statistically verified. There were very few significative effects shown by the cress test, but very interesting tendencies. Indeed, for nearly every measured parameter (germination and raise

rates, number of viable plantlets and number of healthy plantlets), the small windrows obtained better scores than the big ones. This can be explained by the fact that the composting process was not over yet, and the big ones had been settled only 10 weeks before the end of the experiment. This lack of maturity probably resulted in the presence of inhibition molecules for plant. However, the previous product was always one of the worst of every analysed samples. It is true for most of the biological properties but also for physical and chemical ones.

The observed tendencies may not be statistically verified, they give interesting work leads to follow. The exploitation of big windrows going until the end of the process seems to be a good plan to produce some clean compost that can be use in the fields. Moreover, the new compostable wastes inputs are supposed to enhance the chemical properties of the compost: peelings and rests of hydrolat production are rich in easy-to-decompose nutrients and they have very high moisture content, this will decrease the risk of drought in the piles. Nevertheless, some other changes are still desirable

5. Changes to come

Some changes already occurred, such as the incorporation of a part of restaurant wastes into the piles. Some others are planned, and some are still to decide.

Organisational changes

Before this mission, the hotel *La Grée des Landes*, the property of *La Forêt Neuve* and the agronomy & botanic departments made their wood chipping work and their compost independently from each other and not in an optimum way. This is about to change. During the mission, it has been chosen to mutualise these workshops and to produce a better compost that will be used by each site.

One of the big questions during this internship was to find a solution about leaching collect. Indeed, the farm of *La Villouët*, where the experimentation took place and the previous green waste storage emplacement is certified as a sanctuary for birds and biodiversity, certified by an environmental defense association. It is nearly impossible to concrete these lands, and it would need dozens of justifications and authorizations very difficult to obtain. But a few weeks before the end of the internship, it has been known that the company is buying a farm next to *La Forêt Neuve*, 7km away from the Headquarters. This farm produced milk, so there is a stabling: a huge 900m² covered building, with a collecting system. No risk of leaching nor of environmental contamination of clean compost from the surrounding soils or plants. The compost station is not the reason of this purchase, but it is a great opportunity to develop this activity.

Some planning will have to be done now, in order to change the preparation of the starting mixture. The fresh green waste such as grass cuttings can not remain months before to be incorpore to a mixture. For the woodchip it is not such a problem, because it is not easy to decompose. A new organisation has to be found with a storage of woodchip and the confection of windrows when there are big green waste incomes. During spring it could be a monthly preparation of compost piles.

Material changes

The mutualisation of the wood chipping will permit to decrease the global price. A comparison has been done between the economic efficiency of purchasing compared to subcontracting. For a device such as a windrow reverser, it would also be more interesting to purchase one. It is possible to find some cheap second-hand device, but beyond the economical

aspect, the most important on this point is to be free to do the job when it must be done. The cooperative use of this type of machinery can be very interesting for breeders, but it is not adapted to the needs of Yves Rocher, it has been noticed during the mission, some complications occurred.

Another Possibility is to purchase a ventilation device. But the investment is very expensive. It was a real possibility before to know about the farm acquisition, but it is less justified to invest so much money on it now. Nevertheless, some devices from this type of system could offer many benefits, such as a connected temperature-measurement-systems.

Les obligations des gros producteurs de biodéchets

Les textes réglementaires

La loi du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement, dite loi Grenelle 2, a instauré une obligation de tri à la source et de valorisation des biodéchets pour les personnes qui en produisent des quantités importantes.

Les articles R543-225 à 227 du code de l'environnement définissent le champ de cette obligation et précisent les conditions dans lesquelles il convient de la mettre en œuvre.

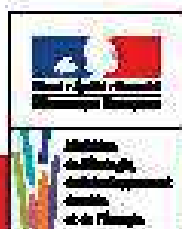
Ce texte dispose notamment que :

- les ménages sont exclus de l'obligation de tri, de même que les exploitants d'installations de traitement de déchets ;
- les biodéchets conditionnés peuvent être collectés dans leur contenant ;
- certains biodéchets d'origine animale sont exclus du champ de l'obligation, de même que les liquides autres que les huiles alimentaires et les déchets ligneux d'élagage ou de taille des végétaux valorisés par voie énergétique.

Un arrêté du 12 juillet 2011 fixe les quantités de biodéchets ou de déchets d'huiles alimentaires produites annuellement au-dessus desquelles leur producteur est soumis à l'obligation d'en assurer le tri à la source en vue de leur valorisation.

Quelles conséquences pour les producteurs de biodéchets ?

Les secteurs économiques les plus directement concernés par l'entrée en vigueur de cette obligation sont la restauration collective et le commerce alimentaire. D'autres secteurs, tels l'entretien des espaces verts et les industries agroalimentaires, sont également concernés, mais le tri à la source des biodéchets y est d'ores et déjà pratiqué de façon assez générale.



Les seuils fixés par l'arrêté sont rapidement dégressifs jusqu'à l'année 2016, afin de donner aux producteurs concernés le temps nécessaire pour assurer à leurs biodéchets la valorisation exigée.

Du fait du niveau élevé des seuils de production pour les biodéchets autres que les huiles lors des deux premières années (120 t/an en 2012 et 80 t/an en 2013), les hypermarchés étaient jusqu'à présent quasiment les seules catégories d'établissements concernés, mais l'impact sur les commerces de taille inférieure et sur la restauration collective est déjà significatif en 2013. La valeur de ces seuils en 2016 (10 t/an de biodéchets et 60 l/an de déchets d'huiles alimentaires) correspond à cette date à une activité telle que l'obligation de tri des biodéchets concernera alors un nombre élevé d'entreprises : on estime en effet que les commerces alimentaires de moyenne surface seront alors tenus de trier et de valoriser leurs biodéchets, de même que les restaurants servant plus de 70 000 repas dans l'année. La circulaire du 10 janvier 2012 apporte des précisions sur les modalités d'application de cette obligation.

Cette obligation de tri à la source constitue une innovation importante, qui amène des changements d'organisation notables de la part des producteurs de biodéchets comme des acteurs assurant leur collecte ou leur traitement. Elle contribuera à l'atteinte des objectifs d'augmentation de la valorisation organique des déchets et de diminution des quantités de déchets orientées en incinération ou en décharge.

Diverses actions ont été entreprises en 2012, avec l'appui de l'Ademe, pour aider les opérateurs à respecter leur obligation de trier et valoriser les biodéchets qu'ils produisent. C'est ainsi notamment que le recensement des installations susceptibles d'effectuer le traitement biologique de ces déchets a été réalisé et mis à la disposition des différents acteurs concernés. Des guides méthodologiques ont été réalisés en concertation avec les professionnels du commerce alimentaire et de la restauration pour leur apporter un appui technique et les orienter sur la façon dont leur profession pourra répondre à l'obligation de valorisation des biodéchets.

Feuil de calcul de l'analyse de porosité, la porosité est présentée en dernière ligne

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2	T
M(tot)g	395.55	299.01	320.37	310.49	502.99	425.54	486.52	317.25	405.1	368.33	471.4	273.38	378.31
M(bécher)	219.07	148.75	151.07	148.98	330.95	252.34	329.74	173.53	217.78	243.93	328.92	148.22	171.56
M(compost)	176.48	150.26	169.3	161.51	172.04	173.2	156.78	143.72	187.32	124.4	142.48	125.16	206.75
V(cm^3)	391.6	391.6	391.6	391.6	391.6	391.6	391.6	350	410	310	351.6	325	391.6
Da	0.45	0.38	0.43	0.41	0.44	0.44	0.40	0.41	0.46	0.40	0.41	0.39	0.53
M1(g)	29.54	31.54	30.87	30.93	30.82	30.5	28.2	29.53	34.63	29	28.5	30.1	32.92
M2	30.36	33.8	32.15	30.57	31.54	31	31.66	30.18	33.23	28.71	29.37	30.23	33.47
Vmet1(mL)	34.2	32.2	33.1	33.3	32.9	33.9	35.2	34.2	31.3	33.8	34.8	33	32.9
Vmet2	34.5	30.8	31.8	33.6	32.7	33.8	32.6	33.1	32.1	32.9	34.1	32.6	33.2
Vr1	15.8	17.8	16.9	16.7	17.1	16.1	14.8	15.8	18.7	16.2	15.2	17	17.1
Vr2	15.5	19.2	18.2	16.4	17.3	16.2	17.4	16.9	17.9	17.1	15.9	17.4	16.8
dr	1.91	1.77	1.80	1.86	1.81	1.90	1.86	1.83	1.85	1.73	1.86	1.75	1.96
P(%)	76.46	78.27	75.94	77.80	75.76	76.77	78.50	77.53	75.36	76.86	78.23	78.04	73.05

échantillon	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2	T
adventices levées	2	34	28	13	33	109	4	2	4		0	1	62
total levées	48	50	47	61	59	40	58	54	46	51	53	50	31
total viables	46	47	44	60	56	38	55	51	44	46	52	43	27
total en bon état	41	40	39	53	50	23	47	33	38		46	26	13
total germées	54	54	54	65	66	43	65	59	54	58	61	53	34
% levées	64.00	66.67	62.67	81.33	78.67	53.33	77.33	72.00	61.33	68.00	70.67	66.67	41.30
% viables	61.33	62.67	58.67	80.00	74.67	50.67	73.33	68.00	58.67	61.33	69.33	57.33	36.00
% en bon état	54.67	53.33	52.00	70.67	66.67	30.67	62.67	44.00	50.67	37.33	61.33	34.67	17.33
% germées	72.00	72.00	72.00	86.67	88.00	57.33	86.67	78.67	72.00	77.33	81.33	70.67	45.33
% viables (parmi levées)	95.83	94.00	93.62	98.36	94.92	95.00	94.83	94.44	95.65	90.20	98.11	86.00	87.10
% en bon état (parmi levées)	85.42	80.00	82.98	86.89	84.75	57.50	81.03	61.11	82.61	54.90	86.79	52.00	41.94

Photographies du dispositif expérimental et du gros matériel utilisé



Figure 4 : broyage du bois au broyeur forestier par un sous-traitant.



Figure 3 : Mise en place des andains ventilés. Une tranchée a été creusée à la main, un drain y a été insérer puis percé dans de nombreux endroits



Figure 5 : Mise en place des petits andains au moyen d'un chargeur articulé



Figure 6 : ensemble du dispositif expérimental avant l'ajout des "grands" andains

Figure 8 : Chargeur télescopique équipé d'un godet grappin, utilisé pour retourner des andains



Figure 7 : retourneur d'andain de la Cuma Aff-et-Vilaine, utilisé à deux reprises pour le retournement. Pilotée par le chauffeur de la CUMA

Suivi des températures de l'expérimentation par andain

	A1	A2	B1	B2	C1	C2
20/04/2019	67.6	42.8	50.3	58.1	39.9	34.5
21/04/2019	69.1	48.6	59.7	68.8	50.4	46.5
22/04/2019	68.3	51.1	67.1	63.0	52.9	53.4
23/04/2019	65.4	54.3	65.5	61.7	54.2	48.7
24/04/2019	65.6	57.9	69.9	58.8	60.0	58.3
25/04/2019	63.3	60.5	64.5	57.2	60.7	59.7
25/04/2019	56.3	59.0	54.9	54.6	60.6	64.7
26/04/2019	47.1	62.5	60.6	46.1	59.9	64.1
26/04/2019	49.1	62.5	60.7	49.2	61.2	59.6
29/04/2019	51.8	61.1	55.5	42.6	43.8	44.1
02/05/2019	60.1	58.5	51.2	41.9	52.0	34.2
03/05/2019	57.7	59.1	51.8	38.5	55.2	38.5
03/05/2019	51.8	53.1	49.0	34.3	47.6	41.3
06/05/2019	56.7	54.9	49.5	32.8	41.8	34.3
07/05/2019	52.4	51.1	47.2	33.7	27.4	28.7
10/05/2019	51.3	49.6	36.3	30.0	26.0	23.8
13/05/2019	48.3	53.8	44.8	27.5	34.0	49.7
14/05/2019	44.2	51.0	37.6	28.8	45.7	49.9
15/05/2019	40.9	50.5	38.9	30.5	47.4	51.7
16/05/2019	41.1	52.1	34.3	31.2	42.8	52.5
16/05/2019	35.0	50.5	32.5	26.0	39.6	46.4
17/05/2019	44.1	49.1	33.7	26.6	45.2	48.4
20/05/2019	43.5	47.1	33.4	32.2	47.2	47.5
21/05/2019	50.4	46.2	35.1	32.6	48.8	47.1
22/05/2019	44.8	46.9	33.1	31.1	46.0	46.9
27/05/2019	44.8	49.2	37.5	35.1	49.5	46.0
28/05/2019	45.1	47.2	37.7	37.9	47.9	43.9
05/06/2019	41.3	36.7	34.6	35.9	27.9	34.1
06/06/2019	43.2	38.5	36.6	37.7	29.9	35.9
11/06/2019	54.7	46.4	40.8	47.8	46.6	42.8
12/06/2019	56.9	46.5	37.5	36.8	39.7	41.4
14/06/2019	55.2	52.4	47.1	51.6	47.3	52.8
17/06/2019	51.1	51.2	48.4	51.4	54.2	53.7
20/06/2019	52.6	50.9	48.7	52.5	52.9	51.0
21/06/2019	48.4	48.4	44.1	48.2	51.7	50.5
24/06/2019	46.8	46.5	44.1	46.3	42.7	49.6
25/06/2019	41.2	43.3	41.1	40.5	46.2	54.2
02/07/2019	46.2	48.0	47.6	50.2	49.5	53.4
03/07/2019	46.5	45.6	41.8	45.1	47.4	48.5
04/07/2019	44.6	44.5	41.9	44.5	45.4	45.9
05/07/2019	45.6	45.0	42.9	46.1	46.5	49.2
08/07/2019	46.9	46.9	44.1	48.6	47.5	50.5
09/07/2019	46.5	45.4	43.2	45.4	46.9	51.7
12/07/2019	39.9	41.8	40.6	43.2	41.5	40.9
16/07/2019	45.5	43.7	42.5	45.6	47.1	48.9
18/07/2019	40.1	41.9	40.5	42.8	46.9	48.5
22/07/2019	37.7	39.2	38.7	39.8	45.0	44.1
25/07/2019	39.1	37.5	38.1	40.9	44.0	43.2

D1	D2	E1	E2	F1	F2
39.9	35.4				
58.2	46.4				
63.7	54.8				
61.7	50.1				
58.6	48.9				
61.9	53.3				
60.6	62.1				
58.7	55.6				
56.4	60.2				
44.8	51.1				
38.6	51.1				
36.4	46.2				
41.5	41.3				
42.4	41.1				
32.3	30.6				
35.9	29.8				
49.3	37.4				
55.5	45.2				
53.0	47.8				
57.0	49.4				
57.5	51.3				
52.6	50.4				
49.9	50.2				
52.4	51.1				
52.5	51.5				
51.6	49.9				
50.1	48.3				
42.8	32.4	71.1	64.4	69.3	72.4
44.7	34.2	70.2	67.1	55.9	60.8
55.3	47.1	65.4	66.3	52.8	63.4
54.1	49.4	64.3	63.7	47.4	58.8
59.6	50.8	60.1	62.8	46.8	57.9
57.0	53.9	58.3	60.3	46.0	54.8
55.3	49.5	58.3	60.3	46.0	54.8
54.1	51.7	58.6	58.5	52.1	55.3
54.2	49.7	44.3	48.9	56.0	56.2
50.6	50.3	46.9	52.7	55.5	54.8
53.8	51.2	49.7	57.4	62.1	58.9
50.0	50.1	49.3	51.5	55.5	51.7
49.6	47.6	47.1	50.7	53.3	54.3
51.6	49.8	49.3	54.2	53.5	54.5
54.6	51.2	48.1	52.6	53.8	57.1
54.4	50.4	50.1	53.6	53.7	56.7
49.7	47.4	41.5	44.5	46.7	53.2
52.0	47.6	45.9	48.7	49.5	56.4
49.7	47.4	47.0	51.9	50.7	56.1
49.5	45.0	49.2	48.1	46.9	53.6
46.2	41.6	48.5	49.4	49.5	53.8

Résultats des analyses du laboratoire Auréa

Référence	N-NO3 dans KCl	Rapport C/N	Azote Total	Carbone organique	Azote organique	P2O5 total	K2O total	MgO total	CaO total	Humidité à 105°C	Humidité Brut	% N + P2O5 + K2O sur brut
A1	0.51	10.70	8.71	9.29	8.19	5.85	12.32	10.73	23.01	61.20	38	1.67
A2	0.37	14.30	7.21	10.29	6.83	4.87	9.69	8.71	21.49	63.50	38.80	1.33
B1	0.18	12.20	8.09	9.87	7.90	4.57	7	8.33	26.40	76.60	43.40	1.11
B2	0.07	13.40	6.97	9.37	6.89	4.89	9.10	8.60	35.84	67.20	40.20	1.25
C1	0.14	13.60	6.38	8.69	6.24	4.36	7.06	8.63	27.70	42.10	29.60	1.25
C2	0.09	13.90	7.18	10	7.09	4.09	7.11	8.38	21.81	46.70	31.80	1.25
D1	0.04	18	5.68	10.20	5.63	4.60	8.10	8.76	24.45	38.20	27.60	1.33
D2	0.09	17	5.37	9.15	5.28	4.01	6.45	9.05	23.66	39.10	28.10	1.14
E1	0.13	12.60	7.04	8.87	6.89	5.06	8.27	7.97	28.95	55.30	35.60	1.31
E2	0.09	16.90	5.91	9.98	5.81	3.80	6.02	7.28	56.91	59	37.10	0.99
F1	0.10	14.20	7.04	9.99	6.93	4.53	7.77	7.66	26.07	84.20	45.70	1.05
F2	0.12	12.30	8.61	10.56	8.48	4.61	6.87	8.52	25.76	60.70	37.80	1.25
T	0.10	14.60	5.72	8.34	5.62	4.34	5.03	7.01	18.25	40.20	28.70	1.08

Référence	Matière sèche	Matière organique	Cendres COMPO ST	P brut en %	K brut en %	N total % (Appareil)	Rapport C/N Organique	Classes Granulo 31.5 mm	Classes granulo 16 - 31.5 mm	Classes granulo 8 - 16 mm	Classes granulo 4 - 8 mm	Classes granulo 2 - 4 mm
A1	62	18.58	81.42	0.36	0.76	0.54	11.30	3.10	6.80	15.80	24.00	25.00
A2	61.20	20.59	79.41	0.30	0.59	0.44	15.10	10.20	10.60	18.40	19.70	18.40
B1	56.60	19.73	80.27	0.26	0.40	0.46	12.50	2.10	9.10	19.60	21.40	23.80
B2	59.80	18.74	81.26	0.29	0.54	0.42	13.60	2.20	6.40	17.30	23.10	22.10
C1	70.40	17.38	82.62	0.31	0.50	0.45	13.90	0.90	2.40	8.90	14.90	20.40
C2	68.20	19.99	80.01	0.28	0.49	0.49	14.10	0.40	2.40	8.10	16.40	21
D1	72.40	20.40	79.60	0.33	0.59	0.41	18.10	3.10	4.10	11.70	17.20	19.40
D2	71.90	18.31	81.69	0.29	0.46	0.39	17.30	1.10	5.30	11.40	18.10	18.90
E1	64.40	17.74	82.26	0.33	0.53	0.45	12.90	1.60	2.80	7	16.80	22.20
E2	62.90	19.97	80.03	0.24	0.38	0.37	17.20	1.70	5.30	12.40	17.70	19.50
F1	54.30	19.98	80.02	0.25	0.42	0.38	14.40	2.20	6.60	12.40	23	22.80
F2	62.20	21.12	78.88	0.29	0.43	0.54	12.50	3.10	7.30	12.30	17.10	19.70
T	71.30	16.68	83.32	0.31	0.36	0.41	14.80	1	8.10	9.40	12.60	15.30

Référence	Classe granulométrie - 2 mm	Classe granulométrie < 1 mm	N-NH4 dans KCl	Azote total + P2O5 + K2O	N Nitrique + ammoniacal + uréique	Azote minéral	pH eau	Rapport MO/N Dumas	Azote Dumas
A1	19.40	5.90	0.00	18.17	5.87	0.52	8.02	21.40	0.87
A2	17.70	4.90	0.00	14.56	5.10	0.38	7.78	28.60	0.72
B1	19.80	4.20	0.00	11.57	2.19	0.19	7.87	24.40	0.81
B2	22.10	6.80	0.00	13.99	0.99	0.08	8.33	26.90	0.70
C1	25.60	27	0.00	11.42	2.14	0.14	8.04	27.20	0.64
C2	25.90	25.80	0.00	11.20	1.29	0.09	7.89	27.80	0.72
D1	22.80	21.70	0.01	12.70	1.00	0.05	8.14	36	0.57
D2	19.40	25.90	0.00	10.46	1.74	0.09	7.74	34.10	0.54
E1	26	23.70	0.02	13.33	2.23	0.15	7.86	25.30	0.70
E2	21.80	21.80	0.00	9.82	1.54	0.10	8.09	33.80	0.59
F1	23.20	9.70	0.00	12.30	1.39	0.11	8.20	28.40	0.70
F2	21.30	19.10	0.00	11.48	1.42	0.13	8.01	24.60	0.86
T	18.50	35	0.00	9.37	1.79	0.10	7.50	29.20	0.57

Non Eleonor/Daniel	Valeur Acquisition	Montant immo	Année immo	Durée de vie réelle	durée utilisation	Coût prix plante	Calcul coût vs amort	Prix entretien annuel	Prix corrigé Herbier
Tracteur 125 cv	52.126.00	27.551.78	8	15	500	8.95 €	8.95 €	1,000.00 €	
Tracteur 85cv						11.50 €	11.50 €	€	11.50 €
Tracteur 60cv	27.930.00	14.326.55	8	15	200	12.81 €	12.81 €	700.00 €	
Souleveuse racines	4.990.47	0.00	8	20	10	10.00 €	10.00 €	5.00 €	5.00 €
Broyeur Desvoys	5.203.57	0.00	8	20	115	16.00 €	16.00 €	8.00 €	8.00 €
Décompacteur 7 dents	6.566.00	5.251.45	8	25	90	3.81 €	3.81 €	80.00 €	
Roll-motte	7.975.00	6.876.52	8	25	40	8.73 €	8.73 €	30.00 €	
Epandeur à fumier	24.000.00	18.355.47	8	30	25	33.20 €	33.20 €	30.00 €	
Epandeur d'engrais 1100 KG	6.532.00	0.0	8	30	15	14.00 €	14.00 €	7.00 €	7.00 €
Epandeur engrais 500KG	304.90	0.00	8	25	20	14.00 €	14.00 €	7.00 €	7.00 €
Charrue	10.000.00	4.404.96	8	15	100	10.47 €	10.47 €	380.00 €	
						#DIV/0!	#DIV/0!	3.00 €	
Cultivateur 13 dents	691.42	0.00	8	30	40	2.58 €	2.58 €	80.00 €	3.00 €
Planteuse 4 rangs	12.318.32	14425.87	8	25	40	12.37 €	12.37 €	2.00 €	
Planteuse 2 rangs	508.43	0.00	8	30	5	12.00 €	12.00 €	10.00 €	2.00 €

Semis combiné: Semoir Gaspardo + Herse rotative machio						10	10	15,00 €	15,00 €	5,00 €	10,00 €
Semoir pneumatique	11,019.00		0.00	8	25		20	10,00 €	10,00 €	5,00 €	5,00 €
Semis en ligne : Semoir Gaspardo			0.00	8	25		22	10,45 €	10,45 €	120,00 €	5,00 €
Bineuse auto-guidage	29,027.00		21036.60	8	25		50	23,30 €	23,30 €	4,00 €	
bineuse Carré			0.00	8	30		40	8,00 €	8,00 €	4,00 €	4,00 €
bineuse rasette			0.00	8	30		100	8,00 €	8,00 €	4,00 €	4,00 €
binneuse Bonnel	3,394.56		0.00	8	30		10	8,00 €	8,00 €	4,00 €	4,00 €
Herse étrille 6 m	6,056.00		0.00	8	30		15	8,00 €	8,00 €	4,00 €	4,00 €
Herse étrille 3 m	1,411.83		0.00	8	30		10	8,00 €	8,00 €	40,00 €	4,00 €
Pulvérisateur (12m)	5,800.00		3477.61	8	20		30	9,67 €	9,67 €		
Semoir petite graine	8,292.00		6,361.55	8	30		1	- €		925,00 €	
Recolteuse De Pietri	90,000.00		0.00	8	20		120	37,63 €	37,63 €	15,00 €	575,00 €
Remorque	4,890.00		3,911.00	8	35		60	2,45 €	2,45 €	7,00 €	
Déchaumeur 24 disques	6,800.00		0.00	8	25		60	11,00 €	11,00 €	4,00 €	7,00 €
Actisol 3 dents			0.00	8	25		10	8,00 €	8,00 €	4,00 €	4,00 €
Vibroculteur 3m	402.01		0.00	8	25			4,00 €	4,00 €	35,00 €	4,00 €

Houe rotative	9,550.00	6613.86	8	20	15	33.17 €	33.17 €	20.00 €	
Tonne a eau + enrouleur	40,100.00	32002.09	8	30	200	6.70 €	6.70 €	4.00 €	
Barre de coupe	2,058.30	0.00	8	30	10	9.86 €	9.86 €	30.00 €	4.00 €
Motoculteur						4.00 €	4.00 €		
Déchiqueteur Blik	9,212.49					4.00 €	4.00 €	4.00 €	
Herse rotative						4.00 €	4.00 €		4.00 €
Broyeur Electra	57,950.00					- €		4.00 €	15.00 €
Cultipacker	551.44	0.00	8	30	5	4.00 €	4.00 €		4.00 €
Séchoir	112,611.13	1984.23	8		1400	10.05 €	10.05 €		
Petit séchoir	184,485.30	14299.14	8		800	28.83 €	28.83 €		
Broyeur forestier	9,885.00		8	20	24	51.48 €	51.48 €		
Retourneur d'andain	31,027.10		8	20	8	484.80 €	484.80 €		
Casier de fermentation aérobic	39,000.00		10		200	19.50 €	19.50 €		
Artemis	125,860.00	90053.19	15		200	41.95 €	41.95 €	40.00 €	

Taux horaire main d'œuvre TECHNICIEN:	30.31 €
Taux horaire main d'œuvre OUVRIER:	22.37 €

Feuille de calcul des couts de proposition de systèmes de broyage

Sous-
traitance

Tâche	durée unitaire	nb fois/an	coût matériel	coût Main d'Œuvre	Prestation de service
Transport du bois	6	1	68.37	134.24 €	
Broyage	8	1	0	0	2000
			coût Total	2202.62	

Achat de
broyeur

Tâche	durée unitaire	nb fois/an	coût matériel	coût Main d'Œuvre	cout total
Transport du bois	1	3	34.19	67.12 €	101.31
Broyage	8	3	1450.43	536.98 €	1987.40
				Total	2088.71

Transport du
bois

matériel	cout horaire
tracteur 125cv	8.95
remorque	2.45
TOTAL	11.40

broyage

matériel	cout horaire
tracteur 125cv	8.95
broyeur	51.48
TOTAL	60.43

Retourneur d'andain

Tâche	durée unitaire	nb fois/an	coût matériel	coût Main d'œuvre	Prestation de	cout total
mise en place	2	4	69.8	178.99 €	0.00 €	248.792
Retournemen	1	8	3878.3875	357.98 €	0.00 €	4236.3715
Suivi	220	1	0	4,922.28 €		
						4485.1635

Note : main d'œuvre *2 pour prendre en compte le déplacement jusqu'à la station en tracteur

Aération forcée

tâche	durée unitaire	nb fois/an	coût matériel	coût main d'œuvre	cout total
Ventilation	0.67	350	4573	0	4573
Chargement/c	9	4	314.1	805.46 €	1120
brassage (épa	1	4	132.8	124.40 €	257
				TOTAL	5950

mise en place	matériel	cout horaire
	tracteur 125cv	8.725
	TOTAL	8.725

broyage	matériel	cout horaire
	tracteur 125cv	8.725
	broyeur	0
	TOTAL	8.725

	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Agronome Spécialisation / option : Agroecology Enseignant référent : Alain Carpentier	
Auteur(s) : Gildas Baron Date de naissance* : 12/12/1995	Organisme d'accueil : Laboratoire de Biologie Végétale Yves Rocher Adresse :	
Nb pages : 26 Annexe(s) : 10	La Croix des Archers, 56201 La Gacilly	
Année de soutenance : 2019	Maître de stage : Eléonor Germain	
Titre français : Analyse techno-économique des procédés de compostage végétal en vue d'une valorisation agronomique des déchets verts Titre anglais : Techno-economic analysis of vegetal composting processes aiming at an agronomic valorisation of green waste		
Résumé : Pour la valorisation d'un nombre important et grandissant de déchets verts en provenance des productions agricoles d'Yves Rocher, de l'entretien des espaces verts et du jardin botanique autour des sites industriels, le compostage paraît être une voie intéressante. Les apports bibliographiques présentés mettent en valeur les mécanismes procédés de compostage et les intérêts de l'utilisation du compost pour améliorer la résilience de systèmes agroécologiques. La réalisation d'andains expérimentaux a permis de diviser par dix la durée de décomposition des déchets verts. Les produits obtenus présentent tous des propriétés améliorées par rapport au produit antérieur, tant du point de vue physico-chimique que biologique. Si des faiblesses dans le dispositif expérimental ne permettent pas de tirer beaucoup de conclusions statistiquement significatives, les améliorations proposées présentent des éléments intéressants en vue d'un meilleur recyclage végétal. L'aspect économique de la problématique est soulevé et les propositions d'amélioration présentées sont chiffrées. L'entreprise devra choisir les rapports investissements réalisés / apports technico-environnementaux attendus des produits. La mutualisation du matériel et des procédés de compostage avec d'autres entreprises et services du groupe va permettre des économies d'échelle et une optimisation technique du compostage.		
Abstract :To value an increasing quantity of green waste coming from the agricultural fields of Yves Rocher, from the maintenance of green areas and the botanical garden around the industrial sites, composting seems to be an interesting path to follow. Bibliographic benefits presented show the mechanisms of composting processes and the interests of compost use to enhance agroecological systems resilience. The fulfilment of experimental windrows permitted to divide by ten the green waste decomposition duration. All the realized products present enhanced properties compared to the previous product, as much on the physico-chemical aspects as the biological ones. The experiment design can't afford many statistically significant results, but proposed improvements offer interesting elements for a better green recycling. The economic aspect of the problematic is studied, and the presented propositions are assessed. The company will choose its ideal relation between investments and their techno-economic expected benefits. Pooling of material and processes with other company of the group will permit economy of scale and technical optimization of composting.		
Keywords : Compostage, déchets verts, recyclage Key Words: composting, green waste, recycling		