



HAL
open science

Valorisation des biomasses agricoles dans une démarche d'économie circulaire par la mise en place du co-compostage a la ferme d'effluent d'élevage et de broyat de déchets verts

Roukaya Youssouf, Jean-Philippe Choisis, Anne-Laure Payet, Eddy Cavillot

► To cite this version:

Roukaya Youssouf, Jean-Philippe Choisis, Anne-Laure Payet, Eddy Cavillot. Valorisation des biomasses agricoles dans une démarche d'économie circulaire par la mise en place du co-compostage a la ferme d'effluent d'élevage et de broyat de déchets verts. CIRAD Réunion; ILEVA. 2023. hal-04084412

HAL Id: hal-04084412

<https://hal.inrae.fr/hal-04084412>

Submitted on 28 Apr 2023

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.

CONVER

CO-CONception d'un scénario de Valorisation des biomasses
dans une démarche d'Economie circulaiRe

VALORISATION DES BIOMASSES AGRICOLES DANS UNE DEMARCHE D'ECONOMIE CIRCULAIRE PAR LA MISE EN PLACE DU CO-COMPOSTAGE A LA FERME D'EFFLUENT D'ELEVAGE ET DE BROyat DE DECHETS VERTS

AVRIL 2023

AUTEURS : ROUKAYA YOUSOUF (1, 2), JEAN-PHILIPPE CHOISIS (2), ANNE-LAURE PAYET (1),
EDDY CAVILLOT (1),

(1) ILEVA, Basse Terre, 97410, Saint-Pierre, France

(2) CIRAD, INRAE, L'institut Agro, SELMET, 97410, Saint-Pierre, France



ETUDE REALISEE DANS LE CADRE DU VOLET 3 DU PROJET CONVER (2019-2023) FINANCE PAR
AGROPOLIS FONDATION ET L'ADEME

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble des personnes qui ont participé à la conception et à la réalisation des essais : Ariste Morel et sa famille, Aurélie Boyer, Emmanuel Legendre, Aldo Payet, Fabien Dutreuil, Gaëlle Tisserand, Henri Robert, Johnny Guichard et les ouvriers agricoles de son exploitation, Laurent Boyer, Lucie Boyer, Yannice Lebreton et Yoann Pellier.

Nous remercions aussi Blanche Reine Javelle et l'association Destination Grand Coude, pour leur participation aux réunions et pour avoir facilité notre accueil dans le territoire.

RESUME

Le co-compostage des effluents d'élevage et du broyat de déchets verts peut être réalisé à la ferme avec le matériel couramment disponible sur l'exploitation (tracteur, godet, tonne à lisier). Dans le cadre du projet CONVER, les cinq essais réalisés en ferme ont permis d'obtenir les résultats suivants. Le temps de travail cumulé pour un andain varie entre 1 à 3 min/m³ de matières. Les teneurs moyennes en pourcentage de matières brutes de N-P-K sont de 1,5-1,0-1,5, pour les co-composts à base de fumier de volaille et de, 0,8-0,5-0,8, pour le co-compost à base de lisier de porc. Les teneurs en matière sèche et en matière organique sont comprises, respectivement, entre 40 et 60 % et entre 30 et 50 %, dans le cas des co-composts à base de fumier de volaille. Elles sont respectivement de 43% et 27%, pour le co-compost à base de lisier de porc. L'ensemble des co-composts obtenus ont tous été hygiénisés et sont conformes à la norme amendement organique, NFU 44-051. Les co-composts ont été testés comme produit fertilisant sur culture de choux et sur prairies de fauche. Dans le premier cas, la fertilisation à base de co-compost a permis d'atteindre le rendement de 40 à 70 t/ha, sur deux des quatre parcelles d'essai. Et dans le second cas, la fertilisation à base de co-compost, complétée ou non par un engrais minéral a permis un gain moyen de rendement compris entre 65 et 191 %, par rapport au rendement moyen du témoin.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	7
ESSAIS DE PROCESS TECHNOLOGIQUE : MISE EN PLACE DU CO-COMPOSTAGE A LA FERME	9
INTRODUCTION	9
MATERIELS ET METHODES	10
RESULTATS ET DISCUSSION	14
CONCLUSION	27
TESTS DES CO-COMPOSTS EN FERME : ESSAIS EN MARAICHAGE	29
INTRODUCTION	29
MATERIELS ET METHODES	30
RESULTATS ET DISCUSSION	33
CONCLUSION	40
TESTS DES CO-COMPOSTS EN FERME : ESSAIS SUR PRAIRIES.....	42
INTRODUCTION	42
MATERIELS ET METHODES	42
RESULTATS ET DISCUSSION	46
CONCLUSION	51
CONCLUSION GENERALE	52

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SITES ET PLANNING DE REALISATION DES ESSAIS DE CO-COMPOSTAGE EN PLEIN CHAMP POUR LES SITES A ET B ET DANS UNE FUMIERE POUR LE SITE C	10
FIGURE 2 : MISE EN ANDAIN ET RETOURNEMENT DES ANDAINS A ET B DE L'ESSAI 1 AVEC DU FUMIER DE VOLAILLE. PHOTO 1 : APPORT D'UNE COUCHE DE BROYAT SUR LE SITE A ; PHOTO 2 : APPORT D'UNE COUCHE DE FUMIER SUR LE SITE A ; PHOTO 3 : APPORT D'UNE COUCHE DE FUMIER SUR LE SITE B.....	12
FIGURE 3 : INJECTION DE LISIER ET MISE EN ANDAIN POUR L'ESSAI 1 AVEC DU LISIER DE PORC. PHOTO 1 : ETALEMENT DU BROYAT AU CHARGEUR SUR LE SITE C ; PHOTO 2 : ASPERSION DU LISIER AU CANON SUR LE SITE C.....	12
FIGURE 4 : SUIVI DE LA TEMPERATURE MOYENNE DES ANDAINS DES SITES A ET B PENDANT L'ESSAI 1 ET EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE EXTERIEURE ET DE LA PLUVIOMETRIE. R = RETOURNEMENT.	16
FIGURE 5 : CARTE THERMIQUE EN 2D DES ANDAINS DE CO-COMPOST DU SITE A (A) ET B (B) PENDANT L'ESSAI 1 A T0 (LE 17/06/21) ; T11 (LE 28/06/21) ; T36 (LE 23/07/21) ET T60 (LE 16/08/21) (DE GAUCHE A DROITE).	17
FIGURE 6 : SUIVI DE LA TEMPERATURE MOYENNE DES ANDAINS DES SITES A ET B PENDANT L'ESSAI 2 ET EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE EXTERIEURE ET DE LA PLUVIOMETRIE. R = RETOURNEMENT.	18
FIGURE 7 : SUIVI DE LA TEMPERATURE MOYENNE DES ANDAINS DU SITE C PENDANT L'ESSAI 1 ET EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE EXTERIEURE ET DE LA PLUVIOMETRIE. R = RETOURNEMENT, ETOILE NOIRE = INJECTION DE LISIER.	19
FIGURE 8 : EVOLUTION DES TENEURS EN MATIERES SECHES (MS), MATIERES ORGANIQUES (MO) ET MATIERES MINERALES (Min) EN POURCENTAGE DE MATIERE BRUTE (MB) DES ANDAINS DES SITES A, B ET C PENDANT LES ESSAIS 1 ET 2.	20
FIGURE 9 : EVOLUTION DE LA TENEUR EN CARBONE ORGANIQUE (CORG) EN POURCENTAGE DE MS DES ANDAINS DES SITES A, B ET C PENDANT LES ESSAIS 1 ET 2.	21
FIGURE 10 : EVOLUTION DE LA TENEUR EN AZOTE TOTAL (NTOT), ORGANIQUE (NORG), AMMONIACAL (N-NH ₄) ET NITRIQUE (N-NO ₃) EN G/KG DE MB DES ANDAINS DES SITES A, B ET C PENDANT LES ESSAIS 1 ET 2.....	22
FIGURE 11 : RESULTAT DE LA CLASSIFICATION, A LA SUITE D'UNE ACP, DES CO-COMPOSTS COMPARES A DES COMPOSTS DE REFERENCE PRODUITS A LA REUNION	24
FIGURE 12 : PLANNING DES ESSAIS MARAICHAGE DES PARCELLES EXPERIMENTALES A, B, C, ET D.....	30
FIGURE 13 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL DES ESSAIS 1 (SUR LES PARCELLES A ET B) A GAUCHE ET DES ESSAIS 2 (SUR LES PARCELLES C ET D) A DROITE	32
FIGURE 14 : EFFET DE LA FERTILISATION SUR 1) LE POIDS TOTAL DES CHOUX DE LA PARCELLE A. LE TEST STATISTIQUE GLOBAL ETANT SIGNIFICATIF UN TEST DE COMPARAISON MULTIPLE A ETE EFFECTUE, * = P-VALEUR DU TEST < 0.05, NS = P-VALEUR DU TEST > 0.05 ; 2) LE POIDS DES CHOUX COMMERCIALISABLES DE LA PARCELLE A. LE TEST STATISTIQUE GLOBAL ETANT SIGNIFICATIF UN TEST DE COMPARAISON MULTIPLE A ETE EFFECTUE. LES MODALITES DONT LES LETTRES SONT DIFFERENTES ONT UN POIDS SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENT. COMP_B1 = COMPOST B1 ; COMP_A1= COMPOST A1 ; ENGR = ENGRAIS NON TRAITE ; REF = REFERENCE PRODUCTEUR ; TNT = TEMOIN NON TRAITE.	35
FIGURE 15 : EFFET DE L'INTERACTION FERTILISATION ET BLOC SUR LES POIDS DES CHOUX DE LA PARCELLE B. LE TEST STATISTIQUE GLOBAL ETANT SIGNIFICATIF UN TEST DE COMPARAISON MULTIPLE A ETE EFFECTUE, LES MODALITES DONT LES LETTRES SONT DIFFERENTES ONT UN POIDS SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENT. COMP_B1 = COMPOST B1 ; COMP_A1 = COMPOST A1 ; ENGR = ENGRAIS ; REF = REFERENCE PRODUCTEUR ; TNT = TEMOIN NON TRAITE. TOUTES CES MODALITE ONT REÇU UN APPORT D'ENGRAIS MINERAL.....	36
FIGURE 16 : EFFET DE L'INTERACTION FERTILISATION ET BLOC SUR LES POIDS DES CHOUX DE LA PARCELLE C. LE TEST STATISTIQUE GLOBAL ETANT SIGNIFICATIF UN TEST DE COMPARAISON MULTIPLE A ETE EFFECTUE, LES MODALITES DONT LES LETTRES SONT DIFFERENTES ONT UN POIDS SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENT. COMP_C1 = COMPOST C1 ; COMP_A2 = COMPOST A2 ; REF = REFERENCE PRODUCTEUR.	38
FIGURE 17 : EFFET DE L'INTERACTION FERTILISATION ET BLOC SUR LES POIDS DES CHOUX DE LA PARCELLE D. LE TEST STATISTIQUE GLOBAL ETANT SIGNIFICATIF UN TEST DE COMPARAISON MULTIPLE A ETE EFFECTUE, LES MODALITES DONT LES LETTRES SONT DIFFERENTES ONT UN POIDS SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENT. COMP_C1 = COMPOST C1 ; COMP_A2 = COMPOST A2 ; REF = REFERENCE PRODUCTEUR.	39
FIGURE 18 : SITES EXPERIMENTAUX ET COMPOSITION FLORISTIQUE DES SITES. ENCADRE BLANC = PARELLE EXPERIMENTALE.	43
FIGURE 19 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL DES ESSAIS PRAIRIES SUR LA PARCELLE A (EN HAUT) ET LA PARCELLE B (EN BAS)	44
FIGURE 20 : 1) PHOTO DE LA MOTOFAUCHEUSE ; 2) PLACETTE EXPERIMENTALE FAUCHEE AVEC LA MOTOFAUCHEUSE ; 3) ECHANTILLONS ELEMENTAIRES DE CHAQUE PLACETTE.....	45
FIGURE 21 : EVOLUTION DU RENDEMENT MOYEN DE CHAQUE FAUCHE (T MS/HA) SUR LA DUREE DE L'ESSAI (PARCELLE A)	46

FIGURE 22 : EFFET DE LA FERTILISATION SUR LE RENDEMENT DE LA PRAIRIE (PARCELLE A). LE TEST STATISTIQUE GLOBAL ETANT SIGNIFICATIF UN TEST DE COMPARAISON MULTIPLE A ETE EFFECTUE, LES MODALITES DONT LES LETTRES SONT DIFFERENTES ONT UN RENDEMENT SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENT. C10 = COMPOST SEUL A 10T/HA ; C5E = ENGRAIS MINERAL ET COMPOST A 5 T/HA ; C10E = ENGRAIS MINERAL ET COMPOST A 10 T/HA ; C15E = ENGRAIS MINERAL ET COMPOST A 15 T/HA ; T0 = TEMOIN NON TRAITÉ.....	48
FIGURE 23 : EVOLUTION DU RENDEMENT MOYEN DE CHAQUE FAUCHE AU COURS DE LA PERIODE D'ESSAI (PARCELLE B)	49
FIGURE 24 : EFFET DE LA FERTILISATION SUR LE RENDEMENT DE LA PRAIRIE (PARCELLE B). LE TEST STATISTIQUE GLOBAL ETANT SIGNIFICATIF UN TEST DE COMPARAISON MULTIPLE A ETE EFFECTUE, LES MODALITES DONT LES LETTRES SONT DIFFERENTES ONT UN RENDEMENT SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENT. T0 = TEMOIN NON FERTILISE ; C5 = CO-COMPOST A 5T/HA ; C10 = CO-COMPOST A 10 T/HA ; C15 = CO-COMPOST A 15 T/HA	50

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : DESCRIPTION DU PROTOCOLE DE CO-COMPOSTAGE POUR LES ESSAIS 1 ET 2 DES SITES A, B ET C.....	11
TABLEAU 2 : RECAPITULATIF DE LA NATURE DES ANALYSES AGRONOMIQUES POUR CHAQUE ESSAI DE CHAQUE SITE	14
TABLEAU 3 : CARACTERISTIQUES DES ESSAIS DE CO-COMPOSTAGE SUR LES SITES A, B ET C.....	15
TABLEAU 4 : ETAPES DE LA FORMATION DES ANDAINS LORS DES ESSAIS 1 SUR LES SITES A, B ET C	15
TABLEAU 5 : COMPOSITION CHIMIQUE DES LISIERS ET FUMIERS DE VOLAILLE (EN G/KG MB)	20
TABLEAU 6 : CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES CO-COMPOSTS ISSUS DES ESSAIS 1 ET 2 SUR LES SITES A, B ET C.....	23
TABLEAU 7 : ESTIMATION DU VOLUME ET DE LA MASSE DES ANDAIN INITIAUX ET FINAUX LORS DES ESSAIS 1 DE CO-COMPOSTAGE SUR LES SITES A, B ET C	25
TABLEAU 8 : BILAN DE MASSE DES COMPOSES VOLATILES ET NON VOLATILES (EN KG) DURANT LE PROCESSUS DE CO-COMPOSTAGE DE FUMIER DE VOLAILLE ET DE BROyat DE DECHETS VERTS.....	26
TABLEAU 9 : CARACTERISATION BIOCHIMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE DES ANDAINS DE CO-COMPOSTS DES ESSAIS 1 ET 2 SUR LES SITES A, B ET C	27
TABLEAU 10 : CARACTERISTIQUES DES PARCELLES EXPERIMENTALES	31
TABLEAU 11 : DESCRIPTION DES MODALITES DU FACTEUR FERTILISATION POUR LES ESSAIS 1 ET 2. EN GRIS : MODIFICATIONS INVOLONTAIRES DU PROTOCOLE PAR RAPPORT AU PROTOCOLE INITIAL.....	32
TABLEAU 12 : RENDEMENT ET POIDS MOYEN DES CHOUX RECOLTES ET COMMERCIALISABLES SUR LA PARCELLE A (ESSAI 1)	34
TABLEAU 13 : RENDEMENT ET POIDS MOYEN DES CHOUX RECOLTES ET COMMERCIALISABLES SUR LA PARCELLE B (ESSAI 1)	36
TABLEAU 14 : APPORT D'AZOTE, DE PHOSPHORE ET DE POTASSIUM EFFICACE SUR LES SITES A ET B EN FONCTION DES DIFFERENTES MODALITES DE FERTILISATION (ESSAI 1)	37
TABLEAU 15 : RENDEMENT ET POIDS MOYEN DES CHOUX RECOLTES ET COMMERCIALISABLES SUR LA PARCELLE C (ESSAI 2)	38
TABLEAU 16 : RENDEMENT ET POIDS MOYEN DES CHOUX RECOLTES ET COMMERCIALISABLES SUR LA PARCELLE D (ESSAI 2).....	39
TABLEAU 17 : APPORT D'AZOTE, DE PHOSPHORE ET DE POTASSIUM EFFICACE SUR LES SITES C ET D EN FONCTION DES DIFFERENTES MODALITES DE FERTILISATION (ESSAI 2)	40
TABLEAU 18 : CARACTERISTIQUES DES SOLS SUR LES SITES EXPERIMENTAUX.....	43
TABLEAU 19 : DESCRIPTION DES MODALITES DU FACTEUR FERTILISATION DES ESSAIS PRAIRIES SUR LES PARCELLES A ET B.....	45
TABLEAU 20 : GAIN DE RENDEMENT DES MODALITES (EN %) PAR RAPPORT AU RENDEMENT MOYEN DE LA FAUCHE DE REFERENCE ET AU RENDEMENT MOYEN DE LA MODALITE T0 (PARCELLE A)	47
TABLEAU 21 : APPORTS D'AZOTE, DE PHOSPHORE ET DE POTASSIUM EFFICACES SUR LA PARCELLE A EN FONCTION DES MODALITES ...	48
TABLEAU 22 : GAIN DE RENDEMENT DES MODALITES (EN %) PAR RAPPORT AU RENDEMENT MOYEN DE LA FAUCHE DE REFERENCE ET AU RENDEMENT MOYEN DE LA MODALITE T0 (PARCELLE B)	50
TABLEAU 23 : APPORTS D'AZOTE, DE PHOSPHORE ET DE POTASSIUM EFFICACES SUR LA PARCELLE A EN FONCTION DES MODALITES ...	51

INTRODUCTION GENERALE

Le projet AGRIPéi 2030 porté par le Département de La Réunion, en concertation avec la profession agricole et les partenaires, a mis en avant la forte volonté du secteur de s'orienter vers une agriculture « performante, solidaire, diversifiée et respectueuse de l'homme et de la nature » (Département de La Réunion, 2019). Ce projet, en lien avec la transition agro-écologique, s'intègre aussi dans un nouveau modèle économique et sociétal de plus en plus prégnant dans les sphères politiques et économiques en France et dont l'inclusion du secteur agricole est essentielle. Il s'agit de l'économie circulaire, un modèle favorisant la réduction, la réutilisation, la récupération et le recyclage des matières, au lieu de la simple production, consommation et élimination des déchets du modèle économique « classique », dit linéaire (Ministère de la Transition Ecologique 2018). Ainsi, l'évolution du secteur agricole vers une transition agroécologique et dans une démarche d'économie circulaire est en cohérence avec les demandes sociétales, concernant la contribution de l'agriculture à l'atténuation du réchauffement climatique, et d'un accroissement de l'autonomie alimentaire et énergétique des populations. Ces demandes sont fortes dans le contexte réunionnais où la pression sur les ressources et les terres limitées ont abouti à la mise en place de systèmes agricoles fortement consommateurs d'intrants importés (engrais minéral, alimentation pour le bétail...) et d'une importation massive d'alimentation humaine, générant, du fait des modes de production et de consommation, un volume croissant de déchets issu de l'agriculture, de l'urbain et de l'industrie agroalimentaire. Ces déchets sont parfois détruits alors qu'ils pourraient être valorisés en agriculture (Jarry 2019). Le recyclage de ces différents déchets et leur valorisation dans une démarche d'économie circulaire représentent donc des enjeux d'autant plus importants que les importations du secteur agricole réunionnais sont génératrices de gaz à effet de serre (Poulet 2021).

Néanmoins, une partie des nutriments utilisés en agriculture proviennent des biomasses locales produites directement par les agriculteurs (effluents d'élevage...) ou par d'autres acteurs (déchets verts, boues de laiteries...). Or, des problématiques de gestion et de valorisation de ces biomasses locales se posent sur le territoire depuis plusieurs années, notamment pour les effluents d'élevage (principalement les lisiers porcins) du fait du risque de pollution des eaux et des sols par ces biomasses, des difficultés d'épandage que rencontrent les éleveurs (Fraboulet, Jourde, Paillat 1998), mais également de l'inadéquation de certains effluents d'élevage aux systèmes agricoles consommateurs d'engrais et d'amendements organiques (Paillat et al. 2005). Ainsi, des études ont été menées afin de répondre à ces différents enjeux et ont permis de caractériser les gisements d'effluents, d'analyser les flux de biomasses, et de proposer des solutions de valorisation (Paillat, Gallo 1996; Paillat, 1998; Jarousseau et al., 2016; Queste, 2016; Wassenaar, Queste, Paillat, 2016). Le projet GIROVAR (Gestion Intégrée des Résidus Organiques par la Valorisation Agronomique à la Réunion) réalisé entre 2011 et 2014 et le projet GABiR (Gestion Agricole des Biomasses à l'échelle de l'île de La Réunion), réalisé entre 2017 et 2020, ont eu pour objectif de mettre en évidence l'inclusion du secteur agricole dans l'économie circulaire de l'île par une approche territoriale de la gestion des biomasses et de définir des scénarii de valorisation des biomasses (Wassenaar et al. 2015 ; Vigne et al. 2021). Ces études ont permis de souligner l'intérêt de la valorisation des effluents d'élevage par le co-compostage à la ferme en mélange avec des broyats de déchets verts, afin de répondre aux enjeux de valorisation des effluents et des broyats de déchets verts et

d'augmenter la circularité de ces matières au sein du secteur agricole (Wassenaar et al., 2015 ; Darras 2019).

Dans ce contexte, l'objet principal de cette étude est l'acquisition de connaissances sur la mise en place du scénario de valorisation des effluents d'élevage par le co-compostage à la ferme en mélange avec du broyat de déchets verts. Ainsi, cette étude permettra (i) de déterminer les modalités (opérations, matériels, temps) de mise en place du co-compostage à la ferme en conditions locales en optimisant l'incorporation de matières à forte valeur azotée à intégrer dans le mélange, (ii) d'apprécier l'intérêt agronomique des co-composts produits en système de culture maraîchère et prairial.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet de recherche participative CONVER (Co-CONception d'un scénario de Valorisation des biomasses dans une démarche d'Economie circulaire à La Réunion) qui fait suite au projet GABiR, et qui vise à raisonner les conditions de traitement des déchets verts urbains et des effluents d'élevage afin de fournir des matières organiques (paillage, amendements et fertilisants) pour les éleveurs et les agriculteurs, et les modalités d'organisation collective permettant une gestion efficiente des flux de matières nécessaires à la mise en œuvre d'une transition agroécologique. Le périmètre géographique du projet est limité à la zone sud de l'île, principalement sur le territoire de la commune de Saint-Joseph où les enjeux agricoles (maintien d'une agriculture diversifiée), urbains (artificialisation des terres), environnementaux (préservation de la ressource en eau potable en lien avec les élevages 'hors-sol' présents en amont ; conservation des milieux naturels en zones centrales et périphériques du parc national...) font que les solutions au développement du territoire sont complexes, et font de cette commune un cas d'étude illustrant bien la problématique de la gestion des effluents à l'échelle de l'île.

Le projet CONVER comporte 4 volets.

- Le premier volet constitue la phase préparatoire qui repose sur l'élaboration d'un diagnostic.
- Le volet 2 est celui qui associe l'ensemble des parties prenantes dans la phase de conception afin d'aboutir à un scénario de transition agroécologique partagé.
- Le volet 3 est celui de l'expérimentation conduite en ferme, avec une étape de mise au point du processus de co-compostage et une étape de test sur des placettes de maraichage et de prairies.
- Le volet 4 consiste à évaluer les conséquences d'un scénario 'tout co-compostage' en termes de revenu et de travail pour l'agriculteur ainsi qu'en termes de bilan azote et phosphore, soit à l'échelle de l'exploitation ou à l'échelle du territoire, en fonction des critères d'évaluation.

Chacun des volets a donné lieu à un rapport présentant les principaux résultats, ce document expose les résultats acquis pour le volet 3.

ESSAIS DE PROCESS TECHNOLOGIQUE : MISE EN PLACE DU CO-COMPOSTAGE A LA FERME

INTRODUCTION

Le compostage est un processus complexe permettant de transformer des matières premières organiques hétérogènes en produit fini homogène, le compost. Il agit comme un amendement organique, améliorant la fertilité du sol (ADEME 2012; Alison, et al. 2020). Les intérêts de ce procédé aérobique pour la gestion des effluents d'élevage sont, de maîtriser des excédents d'azote (abattement de l'azote de l'ordre de 35 à 55 % selon le matériau composté¹) et de phosphore, de réduire les volumes d'effluents à épandre ainsi que les odeurs libérées à l'épandage (RMT Elevage et Environnement 2019). Le compostage permet alors de traiter certains effluents à forte teneur en matière sèche (fumier de bovin et de volaille). Mais cette technique semble a priori moins intéressante pour les effluents liquides comme le lisier, car elle nécessite d'importants apports de matières carbonées pour leur dégradation (Mazé et al. 1996). L'ajout de matières carbonées permet l'obtention d'un produit final solide et moins volumineux. Le co-compostage consiste en un traitement conjoint des matières organiques². A la ferme, cette technique comprend en général le compostage d'effluents d'élevage et de déchets verts. Ce dernier est un excellent support carboné qui permet le compostage d'effluents qui ne composteraient pas seuls². Ainsi, les déchets verts présents à La Réunion sont une ressource carbonée intéressante, disponible (140 000 t de déchets verts sont collectés chaque année sur l'ensemble de l'île (Gaffier, 2017)) et économique, dont l'utilisation en agriculture peut être augmentée et améliorée (Darras, 2019). En théorie, le ratio retenu pour la fabrication du co-compost et l'estimation d'une plateforme est de 3 volumes de matières carbonées (exemple : litières, déchets verts) pour 1 volume de matières à forte valeur azotée (exemple : lisiers et fumiers de volaille) (Alison et al., 2021).

Des études sur le compostage ont déjà été menées à La Réunion depuis plus de 20 ans, et ont permis de caractériser la qualité, l'intérêt agronomique et les risques et impacts sur l'environnement des composts produits (CIRAD, 1997; Jean-Marie Paillat et al. 2005 ; Chabalier et al., 2006 ; Payet et al. 2008 ; Thuriès et al. 2016). Cependant, la variété des pratiques de compostage, les différences de nature des substrats et des paramètres liés aux conditions climatiques, modifient la qualité finale du compost produit. L'optimisation du procédé de co-compostage nécessite donc la réalisation d'essais empiriques et l'établissement de références locales (SICA lait, UAFP, 2001; Oudart, 2013; Robin et al., 2018). Or, à La Réunion peu de références existent concernant le processus et la mise en pratique du co-compostage d'effluents d'élevage (fumier de volaille ou lisier de porc) avec du broyat de déchets verts.

L'objectif de ce travail est donc la construction de références sur les modalités de mise en place du co-compostage par procédé de retournement (ou aération mécanique) d'effluents d'élevage (fumier de volaille ou lisier de porc) en mélange avec du broyat de déchets verts, avec pour

¹ (Circ, n° DGFAR/SDER/C2008-5007, 20 février 2008, relative à l'aide au traitement des effluents d'élevage dans les bassins versants bretons en contentieux)

²<https://bourgognefranche-comte.chambres-agriculture.fr/territoires-environnement/recyclage-agricole-des-dechets/interets-du-co-compostage/>

sous-objectif d'optimiser le ratio d'incorporation de la matière à forte valeur azotée à intégrer dans le mélange et l'obtention de produits répondant à la norme amendement organique NF U44-051. L'acquisition de ces connaissances a aussi une visée de démonstration et d'apprentissage du co-compostage par les agriculteurs, dans la perspective d'une adoption locale du process, avec le matériel disponible sur les exploitations (absence de retourneur d'andain mobile à La Réunion).

MATERIELS ET METHODES

1. Sites expérimentaux

Les travaux ont été conduits chez trois éleveurs de Saint-Joseph, dont deux éleveurs de volaille (sites A et B à 1100 m d'altitude) et un éleveur de porc (site C à 400 m d'altitude) durant la période 2021-2022. Les essais de co-compostage avec du fumier de volaille (sites A et B) ont été réalisés sur une parcelle de prairie appartenant aux éleveurs, en bout de champ, sur une surface de 60 m² (Figure 1). La surface n'étant pas étanche, les andains réalisés au champ ont été couverts d'une bâche Toptex semi-perméable en fibres de polypropène, qui permet les échanges gazeux, draine les précipitations de surface et protège l'andain du dessèchement par le soleil et le vent. La bâche permet ainsi de limiter les lixiviats et suintement de jus tout en garantissant le maintien d'un processus en aérobie. Alors que l'essai de co-compostage avec du lisier de porc (site C), a été réalisé dans la fumière de l'éleveur (Figure 1). La fumière était couverte par une toiture et le sol bétonné était légèrement en pente permettant de recueillir dans une fosse de récupération les jus de fumier.



juin-21	juil-21	août-21	sept-21	oct-21	nov-21	déc-21	janv-22	févr-22	mars-22	avr-22	mai-22	juin-22	juil-22	août-22	sept-22	oct-22	nov-22
Hiver austral						Été austral						Hiver austral					
Site A et B									Site A et C								
									Site B								

Figure 1 : Sites et planning de réalisation des essais de co-compostage en plein champ pour les sites A et B et dans une fumière pour le site C

2. Fabrication du co-compost

Afin de répondre aux objectifs de l'étude, un à deux essais (essai 1 et 2) de co-compostage par retournement des andains ont été réalisés sur les trois sites. Les essais ont été mis en place en hiver et été austral deux saisons bien marquées à La Réunion, afin d'observer l'influence du climat, pluviométrie et chaleur, sur le procédé de co-compostage (notamment pour les essais plein champ) (Figure 1). Seul l'essai 2 de co-compostage de lisier de porc et de broyat de déchets verts n'a pas pu être effectué sur le site C. Par ailleurs ces essais ont permis d'étudier plusieurs facteurs dans la mise en place du co-compostage à la ferme : la nature des effluents, le ratio volumique d'incorporation de la matière riche en azote (exprimé en m³ d'effluent par m³ de broyat), le matériel utilisé, ainsi que les opérations et techniques utilisées tout au long du process (Tableau 1). Deux types d'effluents ont donc été testés, soit du fumier de volaille (FV) ou du lisier de porc (LP), en mélange avec du broyat de déchets verts (BDV). Ce dernier, d'un calibre 0-40 mm, provenait d'une plateforme de traitement et de valorisation des déchets verts d'ILEVA et a été acheminé jusqu'aux exploitations. Le broyat utilisé lors des essais avait déjà subi une fermentation de quelques mois due au stockage en andain sur la plateforme de traitement. Différents ratios volumiques d'incorporation de l'effluent d'élevage au broyat ont aussi été comparés (Tableau 1). La durée du processus de co-compostage différait entre l'essai 1 et 2 avec le souhait de raccourcir le processus, entre l'essai 1 et 2, pour les mélanges composés de fumier de volaille (Tableau 1).

Tableau 1 : Description du protocole de co-compostage pour les essais 1 et 2 des sites A, B et C

Site	Nature des effluents	Ratio souhaité	Durée du process souhaité	Nombre de retournements souhaité
Essai 1				
A	FV	1 : 2	90 jours	2
B	FV	1 : 1	90 jours	2
C	LP	1 : 1,5	90 jours	4
Essai 2				
A	FV	1 : 1,5	60 jours	3-4
B	FV	1 : 1	60 jours	3-4

Le mélange de matières pour les andains composés de fumier de volaille a été effectué en lasagne, en étalant et en superposant une couche de broyat de déchets verts puis une couche de fumier de volaille, et ainsi de suite en terminant par une couche de broyat (Figure 2). Lors du premier essai le mélange a été effectué avec deux matériels différents sur les sites A et B (tracteur-godet plein et remorque ou tracteur et godet crocodile), alors que pour le second essai, seul le mélange au tracteur et au godet a été réalisé sur les deux sites (Figure 2). Pour les essais 1 et 2 des sites A et B, au moins deux retournements ont été effectués en déplaçant les andains sur le côté au tracteur et au godet (d'une capacité d'environ 1 m³).

L'andain constitué de lisier de porc a été réalisé sur une plateforme étanche couverte. Le mélange de matières a été effectué en étalant le broyat au tracteur puis en injectant le lisier avec une tonne à lisier (au canon). Une fois celui-ci ayant bien pénétré le broyat de déchets verts, l'andain était formé (Figure 3). Chaque injection de lisier correspondait à un retournement de l'andain. Ce dernier était effectué au chargeur avec un godet plein d'une capacité d'environ 1 m³.

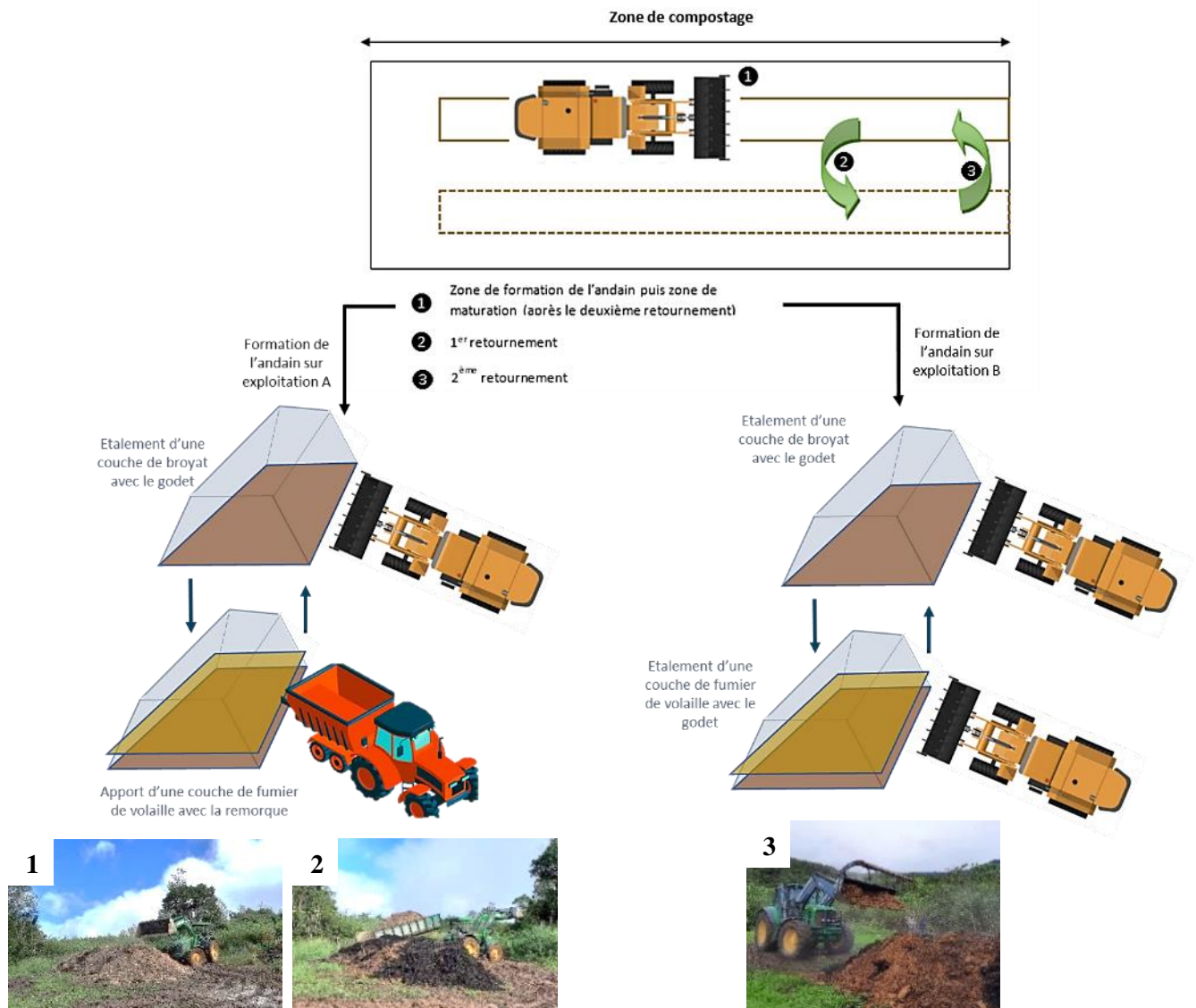


Figure 2 : Mise en andain et retournement des andains A et B de l'essai 1 avec du fumier de volaille.

Photo 1 : apport d'une couche de broyat sur le site A ; Photo 2 : apport d'une couche de fumier sur le site A ; Photo 3 : apport d'une couche de fumier sur le site B

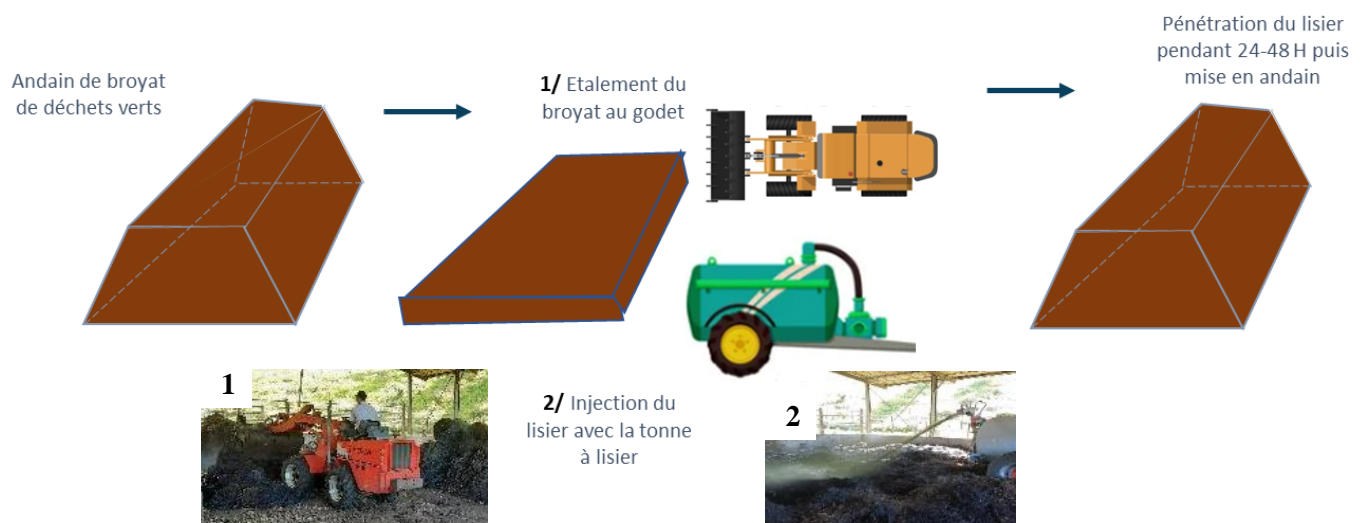


Figure 3 : Injection de lisier et mise en andain pour l'essai 1 avec du lisier de porc.

Photo 1 : étalement du broyat au chargeur sur le site C ; Photo 2 : aspersion du lisier au canon sur le site C

3. Mesures et prélèvements

Trois types de suivi ont été effectués tout au long du processus de co-compostage et concernaient (i) l'évolution de la température et de l'humidité de l'andain, (ii) l'évolution de la teneur en azote et des caractéristiques agronomiques des co-composts, ainsi que (iii) l'évolution du volume des andains.

Le suivi de la température et de l'humidité des andains a permis d'évaluer le bon déroulement du processus de compostage et l'hygiénisation des co-composts. Les relevés de températures ont été effectués 3 fois par semaine pendant la phase de fermentation et une fois par semaine pendant la phase de maturation, à l'aide d'une sonde de température manuelle. Les températures étaient mesurées entre 50-100 cm de profondeur, en 5 à 10 points de l'andain, dont 2 points au cœur. Le suivi de l'humidité était, quant à lui, effectué par prélèvements d'échantillons en 5 à 10 points de l'andain, suivi d'un séchage à l'étuve à 70°C pendant 48 heures. Un taux d'humidité suffisant permettait de s'assurer de bonnes conditions pour l'activité biologique des microorganismes. La gestion de l'humidité se faisait en débâchant et en re-bâchant les andains composés de fumier de volaille, ou en injectant du lisier pour les andains composés de lisier de porc.

Des analyses agronomiques, réalisées en routine par le laboratoire du Cirad à Saint-Denis et par le laboratoire Auréa en métropole pour la normalisation, ont été effectuées sur les effluents d'élevage traités par co-compostage et sur les mélanges en cours de compostage. Pour ces derniers les éléments analysés n'étaient pas identiques. En effet, une analyse agronomique complète a été effectuée au début (T0) et à la fin du processus de co-compostage sur les mélanges, et des analyses intermédiaires ont été réalisées qui concernaient uniquement la teneur en azote total (N_{tot}) et ammoniacal (N-NH₄) ainsi que le taux de matière sèche (MS) et de matière organique (MO) (Tableau 2). Ainsi, un suivi des éléments nutritifs, notamment de l'azote, a été réalisé au travers de ces analyses agronomiques. Les analyses agronomiques du broyat de déchets verts ont été transmises par le gestionnaire des plateformes de traitement des déchets verts. La composition des broyats pouvant varier dans le temps en fonction des apports de déchets verts, les résultats d'analyses de chaque lot livré aux éleveurs ont été récupérés. Pour les effluents d'élevage, une seule analyse a été effectuée pour les deux essais sur chaque site. L'itinéraire technique d'élevage étant constant, il a été supposé que la composition chimique des effluents ne variait pas dans le temps. Le nombre d'analyses effectuées a été réduit lors des essais 2 de co-compostage du fait d'un long délai de traitement des échantillons par le laboratoire du Cirad (3 à 6 mois).

Les quantités d'effluent (en volume) utilisées dans les essais ont été estimées en fonction du nombre de remorques de fumier de volaille apportées ou du nombre de tonnes à lisier. Une masse volumique de 0,45 t/m³ pour le fumier de volaille et de 1 t/m³ pour le lisier a ainsi permis de calculer les masses d'effluents apportées. Pour ce qui concerne le broyat de déchets verts, la masse de broyat apportée aux éleveurs a été fournie, permettant par la suite de calculer le volume de broyat, en utilisant une masse volumique de 0,5 t/m³. Par ailleurs, les mensurations de l'andain ont été prises au début et à la fin du process (les andains ont été assimilés à un trapèze pour le calcul du volume). Ainsi, pour les essais 1 de chaque site, une estimation de la masse volumique des co-composts obtenus a été effectuée, permettant par la suite de calculer une perte de volume et de masse de l'andain liée au compostage. La masse volumique a été estimée en mesurant à cinq reprises la masse du co-compost brut (non séché) contenu dans un

réceptif d'un litre. Un bilan de matières (MM, MO, MS, Ntot, N-NH₄, P et K) plus ou moins précis compte tenu des estimations de la masse initiale et finale des andains, a donc pu être réalisé pour les essais 1 des sites A et B.

Tableau 2 : Récapitulatif de la nature des analyses agronomiques pour chaque essai de chaque site

Site	Stade de compostage	Nature de l'échantillon	Nature des analyses agronomiques	Laboratoire en charge
Essai 1				
A et B	T0	- FV - mélange initial FV et BDV	Ntot, N-NH ₄ , pH, MS, MO, K, Mg, Ca, C/N	Cirad
	T10	mélange en cours de compostage	Ntot, N-NH ₄ , pH, MS, MO	Cirad
	T30		Ntot, N-NH ₄ , pH, MS, MO	Cirad
	T40		Analyse de conformité à la norme NFU 44-051	Auréa
	T80		Ntot, N-NH ₄ , pH, MS, MO	Cirad
	T90	co-compost FV et BDV	Analyse de conformité à la norme NFU 44-051	Auréa
C	T0	LP	Ntot, N-NH ₄ , pH, MS, MO, K, Mg, Ca, C/N	Cirad
	T10	mélange LP et BDV après la première injection	Ntot, N-NH ₄ , pH, MS, MO, K, Mg, Ca, C/N	Cirad
	T78	co-compost LP et BDV	Analyse de conformité à la norme NFU 44-051	Auréa
Essai 2				
A et B	T0	mélange initial FV et BDV	Ntot, N-NH ₄ , pH, MS, MO, K, Mg, Ca, C/N	Cirad
	Fin process	co-compost FV et BDV	Analyse de conformité à la norme NFU 44-051	Auréa

RESULTATS ET DISCUSSION

1. Déroulement de la formation et des retournements des andains

Cinq andains de co-compost d'effluents d'élevage et de broyat de déchets verts ont été constitués à la ferme sur la période 2021-2022. Les objectifs fixés au début des essais en termes de période d'expérimentation, de ratio volumique effluent-BDV, de durée du process et de nombre de retournements, n'ont pas tous été atteints (Tableau 3). Ainsi, du fait d'imprévus en lien avec l'approvisionnement en broyat et en effluents, les essais 1 de co-compostage de fumier de volaille et de broyat de déchets verts effectués sur les sites A et B en hiver austral, n'ont pas permis de tester les ratios volumiques fixés. Les deux andains mis en place ont eu un ratio volumique assez semblable, proche du ratio volumique 1 : 1. Cependant, les essais 2 sur ces mêmes sites ont pu être réalisés en été austral, permettant ainsi de comparer l'influence du climat sur la mise en place du co-compostage au champ. Et lors de ces essais 2, les ratios volumiques souhaités, soit 1 : 1,5 et 1 : 1, respectivement sur les sites A et B, ont été atteints mais sur une durée de process plus longue, 90 et 180 jours, respectivement pour les sites A et B, au lieu des 60 jours souhaités. L'allongement de la durée du co-compostage s'explique par les conditions climatiques pluvieuses qui ont limité l'accès aux parcelles d'essai ainsi que la réalisation des retournements des andains, augmentant ainsi la durée de l'expérimentation. L'essai 1 de co-compostage avec du lisier de porc a été mis en place sur une plateforme étanche couverte du site C en été austral. Du fait de la toiture, l'andain était moins exposé aux aléas

climatiques. L'influence de la saison sur le processus de co-compostage n'a donc pas pu être testé sur ce site mais le ratio volumique, la durée de process et le nombre de retournements souhaités ont pu être atteints.

Tableau 3 : Caractéristiques des essais de co-compostage sur les sites A, B et C

N° essai	Site	Période	Type d'effluent testé	Ratio volumique effluent-BDV souhaité	Ratio volumique effluent-BDV atteint	Durée du process souhaité	Durée effective du process	Nombre de retournements souhaité	Nombre de retournements effectué
1	A	Hiver austral	FV	1 : 2	1 : 0,9	90 jours	90 jours	2	2
1	B	Hiver austral	FV	1 : 1	1 : 1,3	90 jours	90 jours	2	2
2	A	Été austral	FV	1 : 1,5	1 : 1,5	60 jours	90 jours	3-4	2
2	B	Été austral	FV	1 : 1	1 : 1	60 jours	180 jours	3-4	2
1	C	Été austral	LP	1 : 1,5	1 : 1,5	90 jours	90 jours	4	4

Par ailleurs, les essais 1 de co-compostage effectués sur les trois sites ont permis de mettre au point le processus de co-compostage (corrigé et complété lors des essais 2) et d'estimer la durée des opérations de formation et de retournement d'un andain, en fonction des quantités traitées et du matériel utilisé sur chaque site (Tableau 4).

Tableau 4 : Etapes de la formation des andains lors des essais 1 sur les sites A, B et C

	Etape du process	Mise en andain	Retournement
Essai 1 Site A	Opérations	Etalement de couches successives de BDV et de FV	Déplacement de l'andain sur le côté
	Matériels	Remorque + tracteur et godet plein	Tracteur + godet plein
	Durée moyenne de l'opération	~ 1H pour 40 m ³ de matières à traiter	~ 30 min pour 40 m ³ de matières à traiter
Essai 1 Site B	Opérations	Etalement de couches successives de BDV et de FV	Déplacement de l'andain sur le côté
	Matériels	Tracteur + godet crocodile	
	Durée moyenne de l'opération	~ 1H pour 40 m ³ de matières à traiter	~ 30 min pour 40 m ³ de matières à traiter
Essai 1 Site C	Opérations	<ul style="list-style-type: none"> - Etalement du BDV - Injection du lisier - Formation de l'andain après pénétration du lisier 	
	Matériels	Chargeur + tonne à lisier	
	Durée moyenne de l'opération	<ul style="list-style-type: none"> ~ 20 min pour étaler 60 m³ de BDV ~ 50 min pour injecter 5 tonnes à lisier de 8 m³ de lisier < 15 min pour reformer l'andain 	

Sur le site A, la mise en place de l'andain a été effectuée en même temps que la sortie du fumier de volaille du bâtiment, les opérations d'apport de fumier et de mélange de matières étaient donc entrecoupées par le vidage du bâtiment de volaille et le transport du fumier jusqu'à la parcelle d'essai. Le fumier a été apporté au mélange avec une remorque, par déversement de grosses quantités de fumier en couches épaisses sur les couches de broyat. Alors que sur le site B, les couches de broyat et de fumier de volaille ont été ajoutées successivement avec un godet crocodile. L'utilisation du godet a permis d'étaler les couches de matières de façon homogène tout au long de la formation de l'andain, ce qui n'a pas été le cas avec l'utilisation de la remorque. Un suivi qualitatif de l'aspect des andains au cours du processus de co-compostage a permis de mettre en évidence l'importance de la qualité du mélange initial dans la dégradation de la matière. De ce fait pour les essais 2 de co-compostage de fumier de volaille et de broyat

de déchets verts, la mise en andain à l'aide du tracteur et d'un godet a été privilégiée. Pour les deux chantiers de co-compostage, le temps de formation de l'andain a été estimé à environ une heure pour les quantités traitées dans cette étude, soit pour 40 m³ de matières (sans comptabiliser le temps de vidage du bâtiment de volaille sur le site A), ce qui correspond à un temps de formation de l'andain d'environ 1,5 min/m³ de matières traitées (Tableau 4). Sur les deux sites, les retournements des andains ont été effectués au tracteur et au godet, en déplaçant l'andain sur le côté. Le premier retournement a nécessité 30 min d'opération pour 40 m³ de matières, soit près de 1 min/m³ de matières à traiter (Tableau 4). Le deuxième retournement nécessite d'autant moins de temps d'activité que la dégradation est avancée du fait de la perte de matière engendrée par le compostage. Ainsi, il a été estimé que la formation d'un andain de co-compostage de fumier de volaille et de broyat de déchets et la réalisation de deux retournements dans les conditions expérimentales, ont nécessité un temps d'activité cumulé de près de 3 min/m³ de matières traitées, soit 2h au total.

Pour les essais de co-compostage avec du lisier de porc, la méthode qui consistait à étaler le broyat de déchets verts puis à apporter le lisier sur le broyat en laissant un temps de pénétration de 24-48 heures, a permis d'injecter les quantités de lisier souhaitées. Cependant il a été observé que l'ajout de lisier épais (type lisier d'engraissement) pourrait nécessiter une intervention au chargeur afin de mélanger le broyat au lisier et d'optimiser la pénétration de ce dernier. Comme chaque injection de lisier est associé à un retournement de l'andain, les temps d'activités de formation et de retournement correspondent au temps d'étalement du broyat, d'injection du lisier et de reformation de l'andain (Tableau 4). Ainsi, il a été estimé que l'étalement du broyat de déchets verts et l'injection d'une tonne à lisier de 8 m³ et la formation de l'andain, nécessitent un temps d'activité cumulé de 1 à 2 min /m³ de matières.

2. Evolution de la température des andains

Essai 1 de co-compostage de fumier de volaille et de broyat de déchet verts

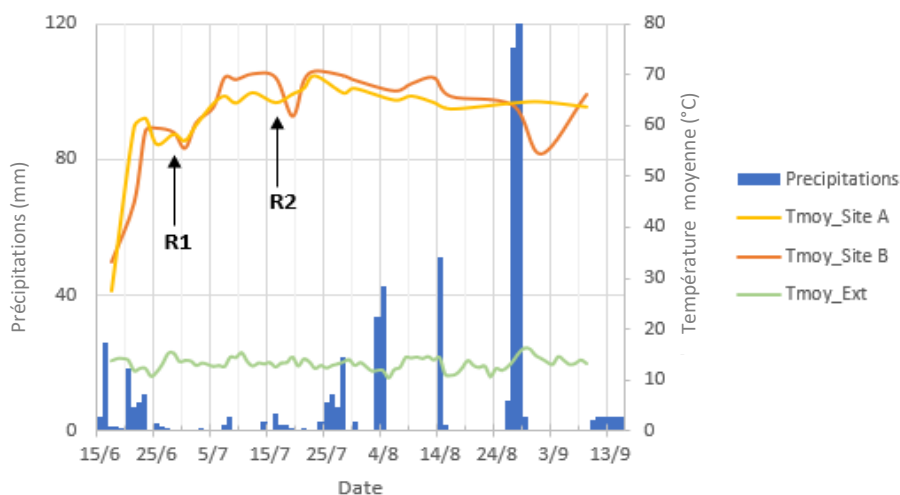


Figure 4 : Suivi de la température moyenne des andains des sites A et B pendant l'essai 1 et évolution de la température moyenne extérieure et de la pluviométrie. R = retournement.

La température moyenne des andains a atteint 50°C au bout de 6 et 18 jours, respectivement sur les sites A et B, et s'est maintenue à plus de 50°C jusqu'à la fin des 90 jours de processus (Figure 4). Les températures élevées observées sur les deux andains (entre 60 et 70°C) attestent de conditions favorables à l'activité des

microorganismes et sont caractéristiques des évolutions de températures observées pour un substrat moyennement biodégradable (Mustin, 1987). Ainsi, durant les cinq premiers jours de compostage l'augmentation de la température est issue d'une production de chaleur intense et

supérieure aux pertes vers l'atmosphère. Les températures se sont ensuite relativement stabilisées, comme le montre les deux courbes (Figure 4), du fait d'un équilibre entre la production et les pertes de chaleur (Mustin, 1987). Une diminution de la température est ainsi un signe d'une production moindre de chaleur du fait d'un affaiblissement de l'activité des microorganismes par épuisement d'oxygène. Les deux retournements effectués 10 jours après la mise en andain et 15 jours après le premier retournement, ont donc permis l'apport d'oxygène nécessaire pour relancer l'activité des microorganismes, puisque l'on observe à la suite de ces retournements une remontée de la température (Figure 4). Les deux co-composts ont ainsi pu être hygiénisés durant ce processus de co-compostage. Par ailleurs, les écarts de température entre les andains des sites A et B sont restés inférieurs à 5°C tout au long du processus de co-compostage, signe que l'intensité globale des biodégradations est assez semblable sur les deux sites. Cependant au sein des andains, des zones relativement plus froides que les autres ont été observées, notamment aux extrémités des andains, indiquant des différences dans la dynamique de compostage (Figure 5). Ces différences peuvent s'expliquer par les mouvements de convection d'air (l'effet cheminée) qui déterminent des zones plus chaudes, généralement à cœur et en haut, et des zones plus froides à la périphérie et au fond (Gobat et al., 2003).

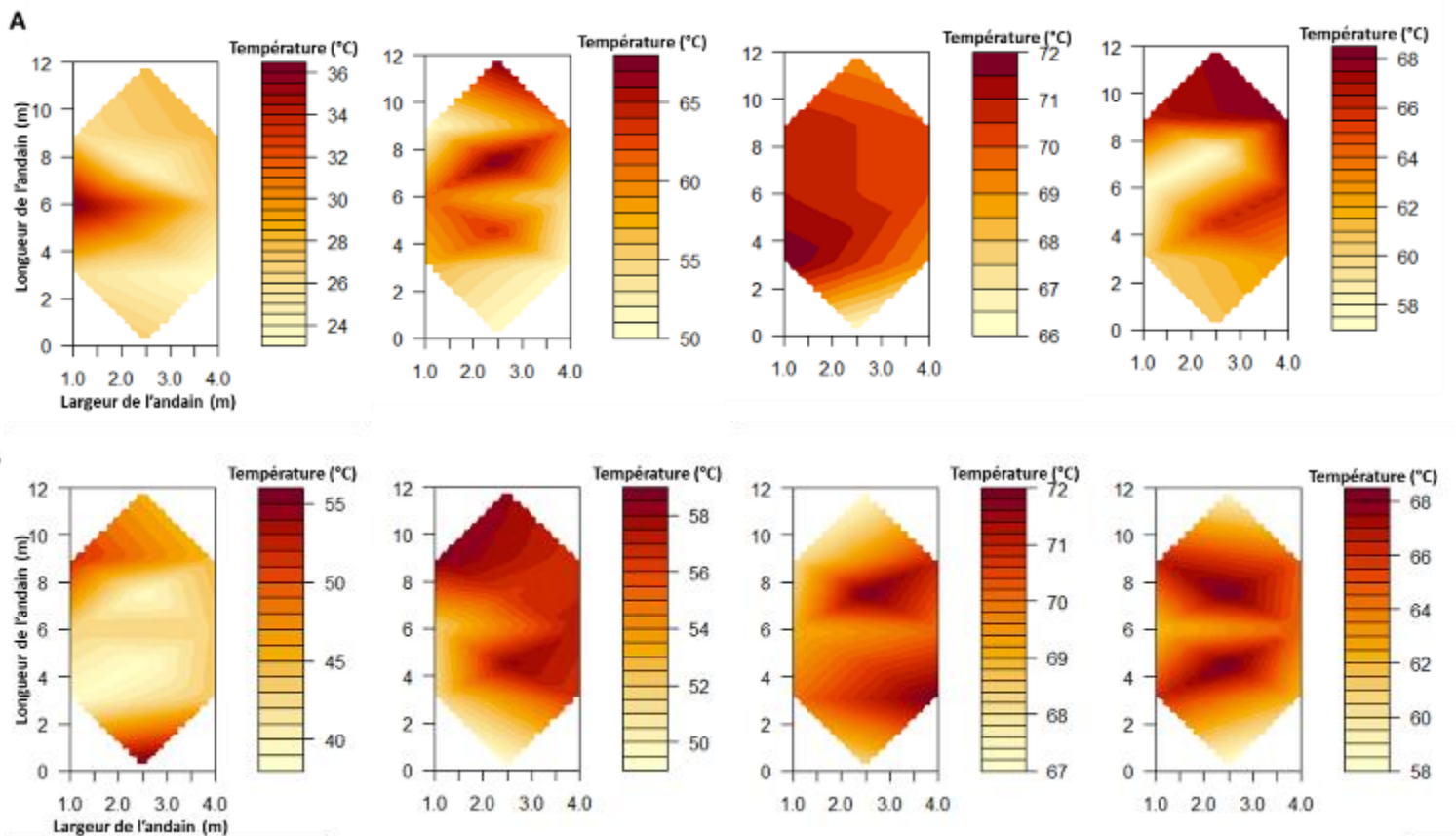


Figure 5 : Carte thermique en 2D des andains de co-compost des sites A et B pendant l'essai 1 à T0 (le 17/06/21) ; T11 (le 28/06/21) ; T36 (le 23/07/21) et T60 (le 16/08/21) (de gauche à droite).

Essai 2 de co-compostage de fumier de volaille et de broyat de déchet verts

Lors de cet essai, les températures ont été globalement moins élevées que pendant les essais 1. En effet, sur les deux sites, la forte montée en température à l'issue de la mise en andain n'a pas

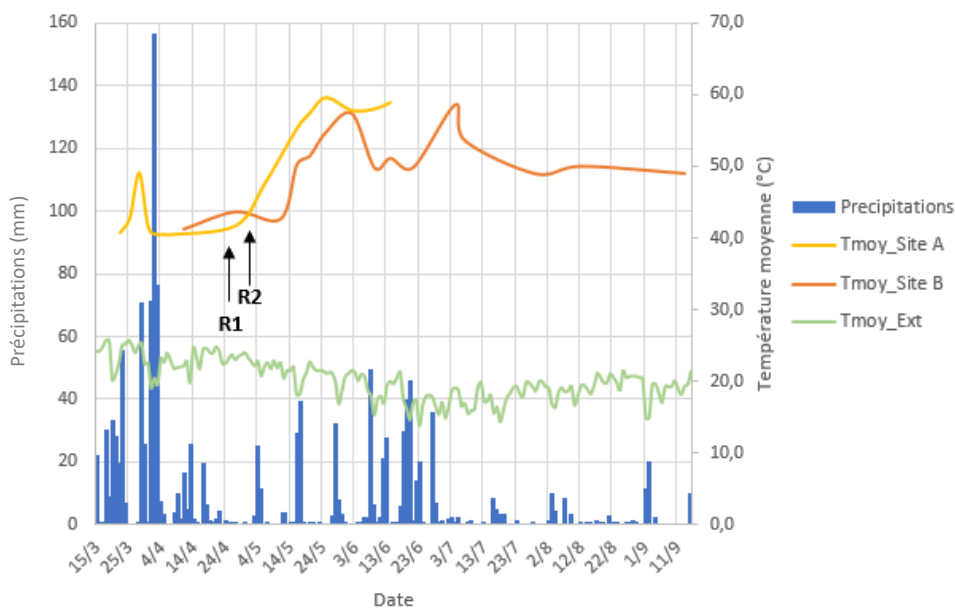


Figure 6 : Suivi de la température moyenne des andains des sites A et B pendant l'essai 2 et évolution de la température moyenne extérieure et de la pluviométrie.
R = retournement.

mesuré durant le premier mois après la mise en andain (Figure 4). Par ailleurs, les andains n'ont pas été bâchés directement après la mise en andain, mais une et plusieurs semaines après, respectivement sur les sites A et B, du fait d'une indisponibilité des éleveurs. Ainsi, le taux d'humidité des andains exposés à la pluie a augmenté, sachant que le taux d'humidité initial était de 57% et de 51%, respectivement sur les sites A et B, limitant de fait les échanges d'oxygène, par réduction de la porosité des mélanges (Paillat et al. 2005). Les conditions ne permettant pas d'accéder aux parcelles d'essai, ni de réaliser les retournements nécessaires pour optimiser l'apport d'oxygène et la perte d'eau des andains, les températures se sont maintenues autour de 40°C avant d'augmenter lentement une fois le deuxième retournement réalisé, soit plus d'un mois après la mise en andain. Sur le site A, la température a atteint 50°C 10 jours après le deuxième retournement et s'est maintenue au-dessus de 50°C jusqu'à la fin de l'essai. Alors que sur le site B, la température a atteint 50°C 20 jours après le deuxième retournement et s'est difficilement maintenue au-dessus de 50°C, comme en attestent les différentes variations de la courbe de température (Figure 6). L'hygiénisation de l'andain B a quand même pu être réalisé, le couple temps-température ayant tout juste été respecté.

Essai 1 de co-compostage de lisier de porc et de broyat de déchet verts

Pendant la phase d'injection de lisier sur le broyat (30 premiers jours) la température moyenne de l'andain a été élevée et a varié entre 50 et 70 °C (Figure 7). A la première injection de lisier (de 16 m³), la température de l'andain est montée rapidement (de l'ordre de 3°C/j) jusqu'à atteindre 70°C, due à la présence de matières carbonées facilement dégradables (Figure 7). Les injections suivantes (de 8 m³ chacune) ont induit une baisse de la température (Figure 7), probablement liée à une réduction de la porosité du mélange par apport de liquide, limitant l'apport d'oxygène et donc l'activité des microorganismes. La température de l'andain a augmenté ensuite, mais avec un pic de température plus bas, soit un pic de température de 65

été observée sur le site B, et a été faible sur le site A. La température n'a pas dépassé les 50°C et a diminuée au bout d'une dizaine de jours après la mise en andain (Figure 6). Les fortes précipitations mesurées pendant le premier mois d'expérimentation ont probablement impacté la dynamique de température puisque sur cette période un cumul de 713 mm de pluie a été mesuré (Figure 6), alors qu'en comparaison lors des essais 1, un cumul de 96 mm de pluie a été

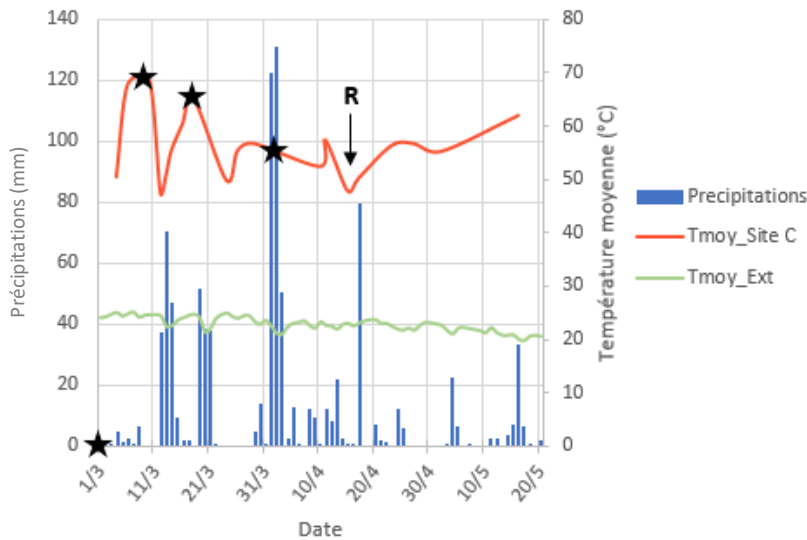


Figure 7 : Suivi de la température moyenne des andains du site C pendant l'essai 1 et évolution de la température moyenne extérieure et de la pluviométrie.
R = retournement, étoile noire = injection de lisier.

l'ordre de 0,4 °C/j, mais qui s'est maintenue au-dessus de 55°C pendant 15 jours permettant de garantir l'hygiénisation de l'andain.

Ainsi, sur l'ensemble des essais, les co-composts ont pu être hygiénisés. Pendant, l'essai 1 la dynamique de température a mis en évidence une biodégradation active des matières, nécessitant par moment la réalisation d'un retournement afin d'apporter l'oxygène indispensable à l'activité des microorganismes. Cette dynamique est néanmoins impactée par la nature des substrats ainsi que par la porosité du mélange. Une très forte humidité de l'andain engendre une baisse de la température et une cinétique de température plus lente. Il apparaît alors nécessaire d'optimiser la perte d'eau et l'apport d'oxygène en réalisant des retournements. Par ailleurs, les phases de refroidissement et de maturation, caractérisées par une diminution de la température des andains, n'ont pas été observées durant ces essais. L'activité des microorganismes est alors supposée toujours importante, du fait de la présence, dans les andains, de matières organiques qui se dégradent lentement, notamment du broyat de déchets verts. Par comparaison, le compostage de broyat de déchets verts sur les plateformes d'ILEVA dure 6 à 8 mois.

3. Evolution de la composition chimique du mélange d'effluents d'élevage et de broyat de déchets verts en cours de co-compostage

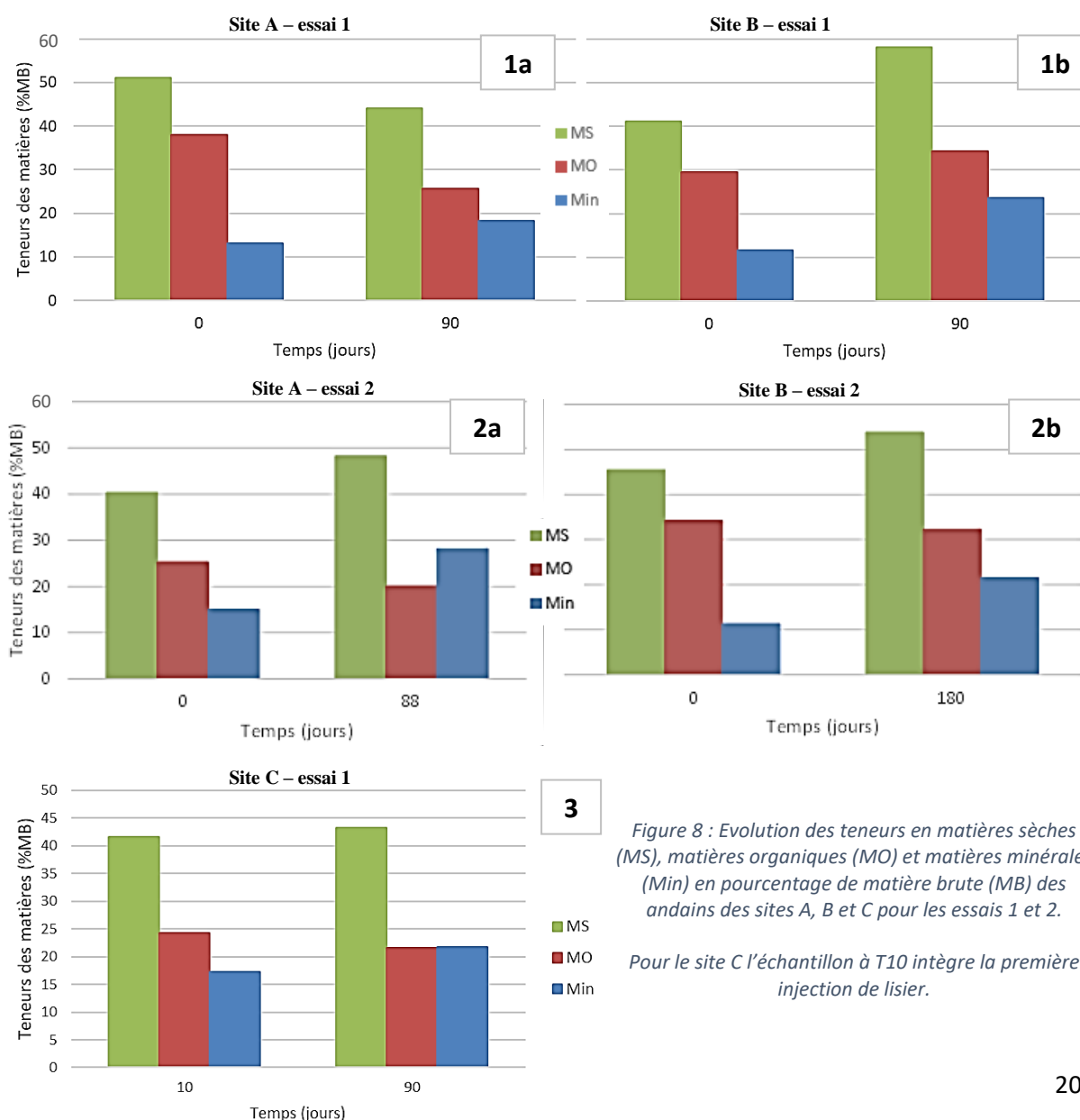
Le Tableau 5 présente la composition chimique des matières entrantes (effluents et broyat de déchets verts). Les valeurs agronomiques des effluents utilisés sont proches des valeurs des effluents de référence présents à La Réunion (Chabalier et al., 2006), sauf pour le fumier de volaille du site B, où la teneur en éléments fertilisants est plus faible, ce qui probablement lié au stockage au champ, sans bâche, avant le début de l'essai 1. Pour le broyat de déchets verts, les lots livrés sur les sites A et B lors des essais 1 et 2 sont assez comparables. Cependant, le lot de broyat livré sur le site C, se distingue des autres par un taux de matière sèche et de matière organique plus élevé ainsi qu'une plus grande richesse en éléments fertilisants.

Tableau 5 : Composition chimique des lisiers et fumiers de volaille (en g/kg MB)

Type de matières	Fumier de volaille site A	Fumier de volaille site B	Lisier de truie site C	BDV site A et B	BDV site A et B	BDV site C
Numéro de l'essai	1 et 2	1 et 2	1	1	2	1
MS	612,04	288,87	1,19	575	560	793
MO	509,7	244,7	7,13	428,7	468,6	677
Ntot	30,06	15,93	1,25	4,51	5,3	10,11
N-NH ₄	7,11	6,21	0,96	0,19	0,03	0,06
N-NO ₃	2,29*	1,20*	-	<0,003	<0,003	0,023
P	6,72	3,28	0,34	1,66	1,33	2,74
K	21,50	6,02	0,94	6,61	6,88	10,5

*Valeur estimée

La Figure 8 présente l'évolution des teneurs en matières sèches (MS), organiques (MO) et minérales (Min) des co-composts. Globalement, le taux de MS augmente pendant le processus de compostage, sur l'ensemble des essais, sauf sur le site A du 1^{er} essai (Figure 8, 1a) où il diminue. Le gain en MS s'explique par une évaporation de l'eau du fait de l'élévation de la température des andains. A l'inverse, le gain d'humidité au cours du compostage de l'andain 1 du site A est probablement lié aux intempéries observées (Figure 4).



Le taux de MS final, de l'ensemble des andains, est supérieur à 40%. Il varie entre 40 et 59 % selon les andains. Pour la teneur en MO, une diminution globale est observée sur l'ensemble des andains, excepté l'andain B de l'essai 1 (Figure 8, 1b). Cette diminution, comprise entre 10 et 30%, selon les andains, est combinée à un enrichissement des co-composts en matières minérales, du fait de la dégradation de la MO au cours du compostage (Francou, 2003; Oudart, 2013) et de la diminution du carbone organique de 13 à 30 % (Figure 9). L'oxydation des composés carbonés facilement dégradables, provenant en particulier des effluents d'élevage lors de la dégradation de MO, aboutit notamment à la production de CO₂ (émis vers l'atmosphère), de chaleur et d'eau ainsi qu'à la diminution de la part de carbone au sein de la MS (Francou, 2003; Oudart, 2013).

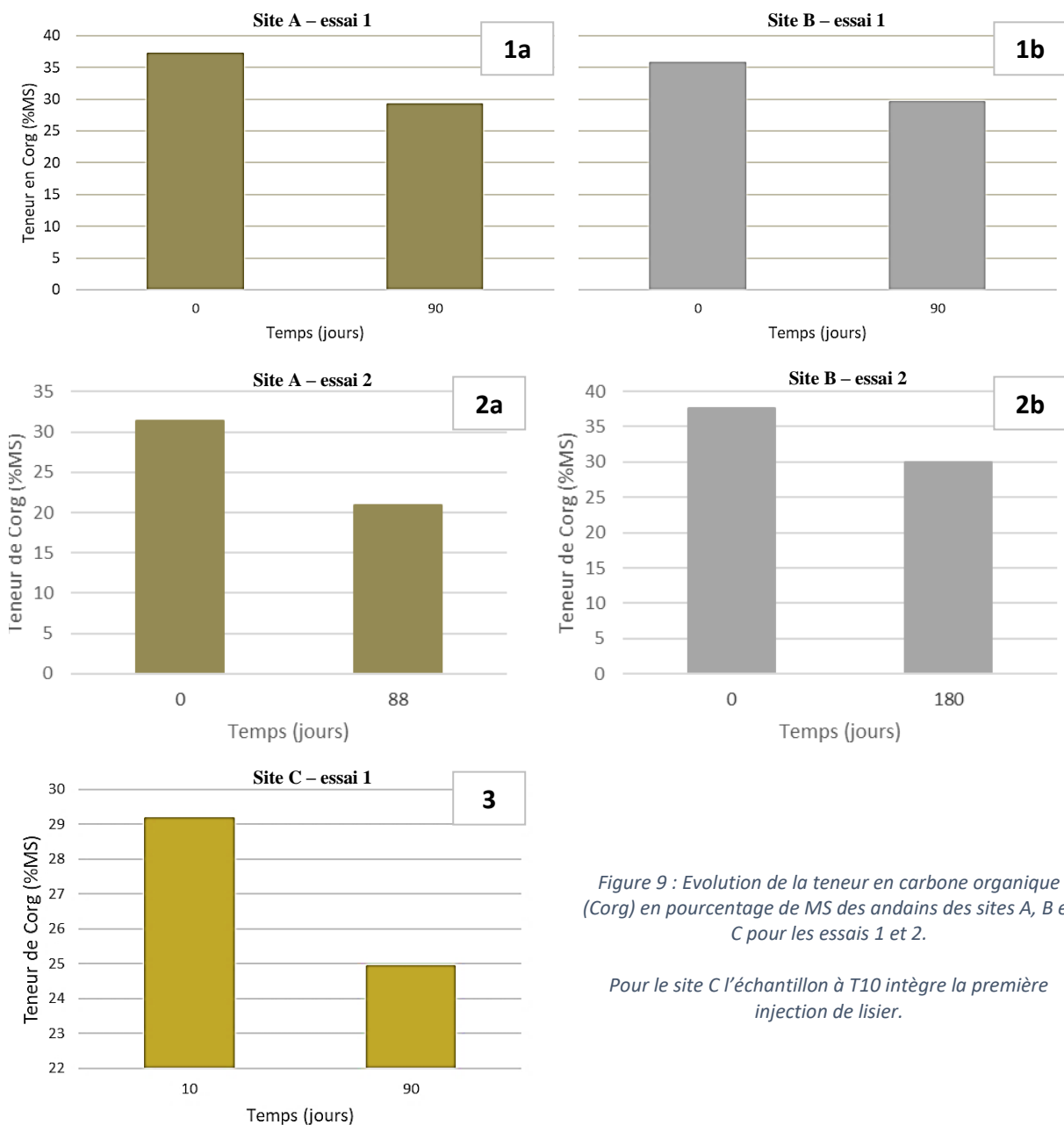


Figure 9 : Evolution de la teneur en carbone organique (Corg) en pourcentage de MS des andains des sites A, B et C pour les essais 1 et 2.

Pour le site C l'échantillon à T10 intègre la première injection de lisier.

Les évolutions des teneurs d'azote totales (Ntot), organiques (Norg), ammoniacales (N-NH₄), et nitriques (N-NO₃) des essais 1 et 2 sur les sites A B et C, sont présentées dans la Figure 10. On observe une hausse de la teneur en Ntot des co-composts des sites B et C (Figure 10-1b, 2b et 3), et une diminution pour les co-composts du site A (Figure 10-1a et 1b). Cependant rapportée à la matière sèche, la teneur en Ntot des andains A et B a diminué au cours du compostage alors que pour l'andain C l'augmentation se confirme. Ces évolutions différentes peuvent s'expliquer par des dynamiques distinctes dans la transformation de l'azote au cours du compostage. En effet, la minéralisation de l'azote organique des effluents durant la dégradation de la MO, via notamment l'ammonification, conduit à une production de N-NH₄ dont une partie pourra être réincorporée dans le métabolisme des microorganismes actifs, ou incorporée dans la MO des co-composts lors de leur humification ou bien libérée dans la matrice (Francou, 2003). Or, une fois N-NH₄ présent dans la matrice, il peut être transformé en ammoniac (NH₃) dont la volatilisation engendre des pertes d'azote. Ainsi, une diminution importante de N-NH₄ est observée au cours du compostage due probablement à ces pertes.

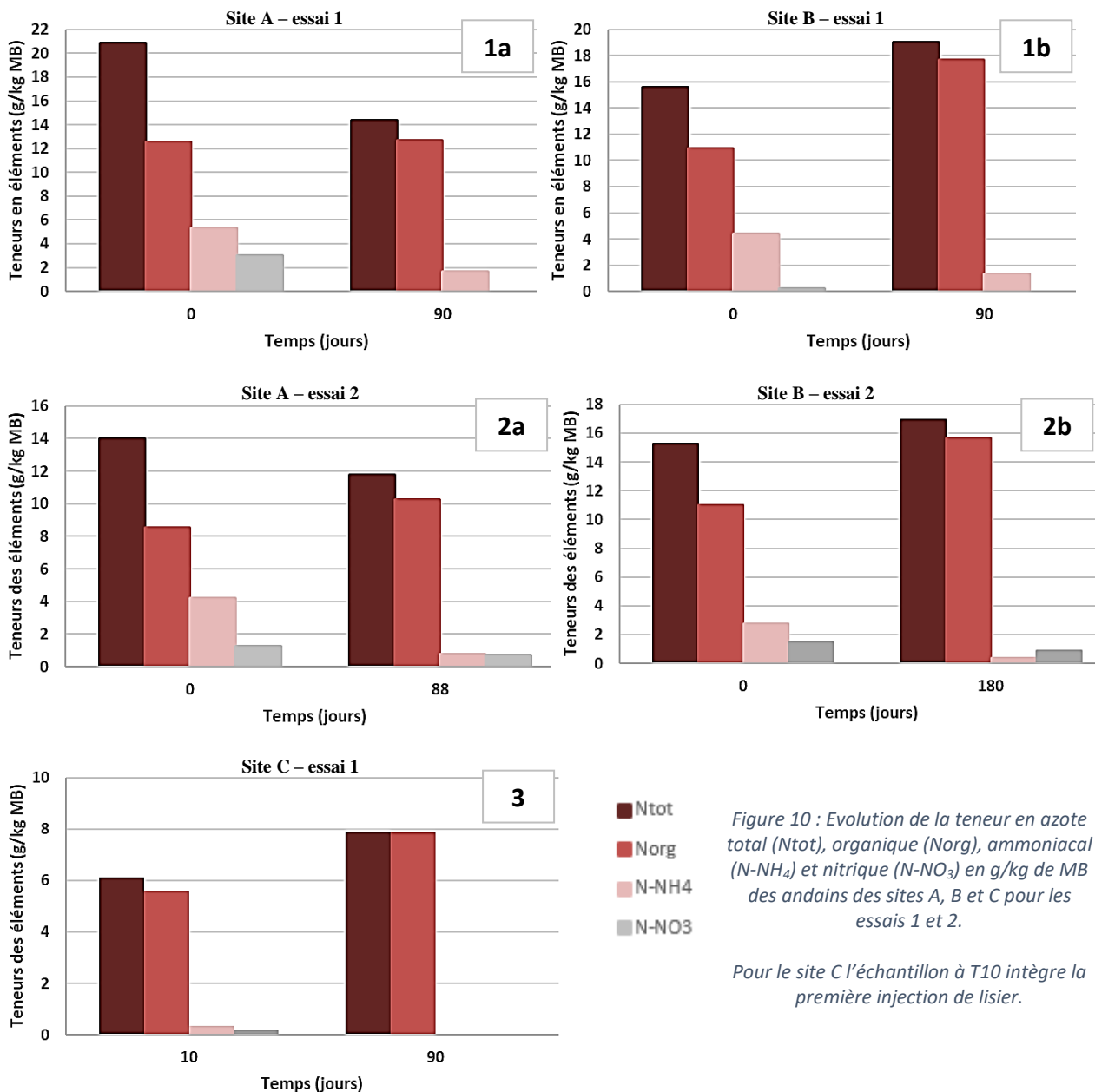


Figure 10 : Evolution de la teneur en azote total (Ntot), organique (Norg), ammoniacal (N-NH₄) et nitrique (N-NO₃) en g/kg de MB des andains des sites A, B et C pour les essais 1 et 2.

Pour le site C l'échantillon à T10 intègre la première injection de lisier.

L'évolution de N-NO₃, présentée sur la Figure 10, met en évidence une apparition des nitrates au cours du process et leur diminution à la fin du processus de co-compostage. La nitrification est normalement peu constatée dans la première phase du compostage (du fait des fortes températures à l'intérieur de l'andain), mais ce processus est retrouvé dans la transformation des litières ; la nitrification a donc pu débuter avant la formation des andains (Paillat et al., 2005). Par ailleurs, la présence de zones plus froides au sein des andains, avec une température inférieure à 45 °C et la présence d'un pool d'ammonium ont pu permettre cette nitrification au cours du compostage (Paillat et al., 2005).

Les mesures de carbone organique et d'azote total ont permis de calculer et de suivre l'évolution du ratio C/N (Corg/Ntot) des mélanges tout au long du processus de co-compostage (les courbes ne sont pas présentées). Ainsi, le ratio C/N initial des co-composts, compris entre 9 et 11 pour les mélanges à base de fumier de volaille et proche de 20 pour le mélange à base de lisier de porc, diminue entre le mélange initial et le produit final pour atteindre une valeur comprise entre 8 et 10. Cela concorde avec ce que l'on peut trouver dans la littérature, soit une diminution du C/N pour arriver à des valeurs généralement comprises entre 8 et 25 (Francou 2003).

Ainsi, les co-composts issus de ces essais ont montré des évolutions chimiques assez semblables malgré quelques différences aboutissant à des produits dont les caractéristiques chimiques en fin de process sont résumées dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Caractéristiques chimiques des co-composts (g/kg MB) issus des essais 1 et 2 sur les sites A, B et C

Co-compost	Ntot	N-NH ₄	P	K	MS	MO	C/N
A - essai 1	12,7	1,7	9,8	13,9	441	257	9,1
B - essai 1	17,7	1,4	9,6	18,0	581	344	9,5
C - essai 1	7,9	0,01	4,8	8,0	433	216	19,9
A - essai 2	11,8	0,8	9,5	10,0	482	201	9,0
B - essai 2	17,0	0,4	12,6	14,6	538	323	11,2

Les co-composts obtenus sont conformes à la norme NF U44-051, sur l'ensemble des critères physico-chimiques, microbiologiques, de composés traces organiques (CTO), en éléments traces métalliques (ETM), et éléments inertes et impuretés. Une ACP, suivie d'une classification hiérarchique, a été effectuée sur les critères Ntot, phosphore total (P), potassium total (K), MS et MO afin de comparer les composts obtenus à l'issue des essais avec des composts de référence présents à La Réunion (le tableau des données et le plan factoriel des individus sont en ANNEXE 1). L'objectif était d'apprécier l'intérêt agronomique des co-composts produits lors de ces essais par rapport à des composts réalisés à La Réunion à partir d'autres matières organiques (Figure 11). Ainsi, le groupe 1 (compost de fumier de poule pondreuse de référence) du dendrogramme se différencie des autres groupes par une teneur en phosphore très importante. Les composts du groupe 2 sont composés, d'une part, du compost de fumier de volaille de chair de référence et d'une partie des co-composts de fumier de volaille et de broyat de nos essais. Ce groupe est caractérisé par une forte teneur en azote et matière organique par rapport aux autres groupes. Les caractéristiques des composts des groupes 1 et 2 semblent cohérentes avec ce qu'il est connu des composts de fumier de volaille et de poule pondreuse. Cependant, une autre partie des co-composts expérimentaux a été classée dans le groupe 4, caractérisé par une proportion en MS plus importante et des teneurs en Ntot, P et K moyennes par rapport aux autres groupes.

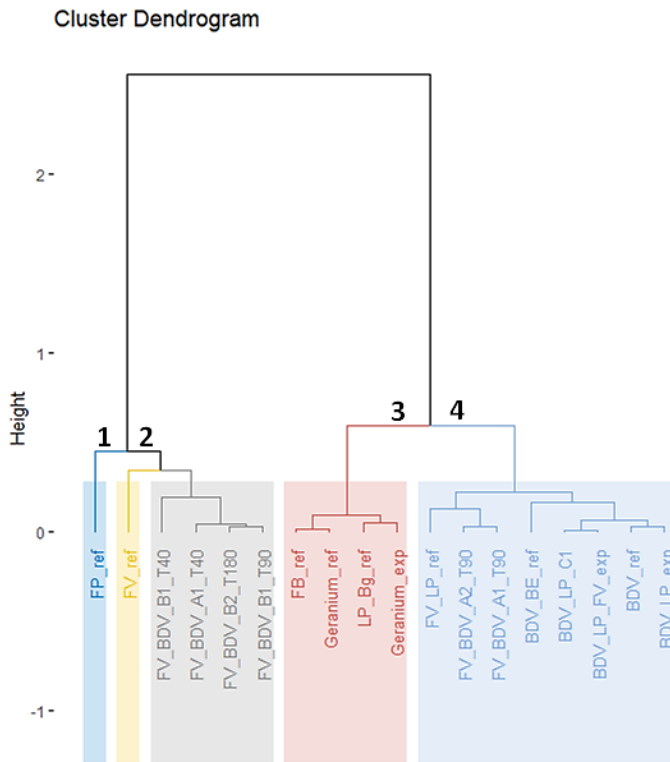


Figure 11 : Résultat de la classification, à la suite d'une ACP, des co-composts comparés à des composts de référence produits à La Réunion

4. Bilan de masse

La masse initiale estimée des andains des essais 1 est très proche sur les trois sites, mais le volume est très différent et varie de 37 à 60 m³ (Tableau 7). A l'issue des 90 jours de compostage, il est observé une perte de masse de 51% pour l'andain B, ce qui correspond à une perte de masse classique (Alison et al. 2021), alors que l'andain A n'a perdu que 13 % de sa masse initiale. De même, la perte de volume est plus importante pour l'andain B. Les pertes de masse et de volume sont sensiblement identiques pour l'andain A, alors que la perte de masse est bien supérieure à celle du volume pour l'andain B (Tableau 7). La conséquence d'une perte de masse plus importante qu'une perte de volume est une augmentation de la porosité à l'air libre des andains (Rafolisy et al. 2015). Pour l'andain C, le volume initial mesuré est celui de l'andain de broyat initial, car l'ajout de lisier ne change pas le volume global de l'andain. En effet le lisier va occuper les espaces vides de l'andain. Cependant, la masse initiale de l'andain tient compte des 40 t de lisier apportées au broyat. Les pertes de lisier par écoulement ont été négligées. Ainsi, les pertes de volume et de masse sont respectivement de 17 et de 60%. Cette perte de masse est la plus importante obtenue au cours de ces essais 1. En revanche la perte de volume la plus importante a été obtenue sur l'andain B, soit 35% de perte de volume.

Enfin, le groupe 3 se différencie des autres par des teneurs en Ntot, P, K et MO faibles. Ainsi la Figure 11 met en évidence que les co-composts de fumier de volaille et de broyat de déchets verts correspondent à des produits intermédiaires entre le compost de broyat et le compost de fumier de volaille de chair. Les co-composts de lisier de porc et de broyat s'apparentent quant à eux à des composts de broyat et des co-composts de broyat et de boues de STEP. La comparaison présentée ici avec les composts de référence est assez grossière et pourrait être affinée car elle ne tient pas compte des variations qui peuvent exister dans les échantillons de référence, ni de la teneur en azote ammoniacal des produits.

Tableau 7 : Estimation du volume et de la masse des andain initiaux et finaux des essais 1 de co-compostage sur les sites A, B et C

Site	Volume initial de l'andain (m^3)	Volume final de l'andain (m^3)	Perte de volume (%)	Masse initiale de matière (t)	Masse volumique du co-compost final (t/m^3)	Masse finale de matière (t)	Perte de masse (%)
A	43	38	12	20	0,46	17,5	13
B	37	24	35	18	0,37	8,9	51
C	60	50	17	61	0,49	24,5	60

Les processus biophysiques et chimiques qui ont lieu pendant le compostage provoquent des pertes de matières, principalement des pertes d'eau et de carbone (sous forme de CO₂) (Elkader et al. 2007 ; Rafolisy et al. 2015). A cela s'ajoutent des pertes d'azote du fait principalement de la volatilisation de l'ammoniac. Les évolutions de matières présentées dans la partie précédente, résultent de ces processus biophysiques et chimiques, et sont à mettre en regard avec le bilan de masse. Ce dernier est exprimé pour les composés non volatiles (MM, P, et K), permettant de valider ou non le bilan, et pour les composés volatiles (MS, MO, Corg, N_{tot} et N-NH₄). Les mesures portent sur les intrants (effluents et broyat de déchets verts) et les co-composts finaux. Les andains ayant été bâchés pendant le processus de compostage, les pertes par lessivage et lixiviation sont supposées très faibles, ainsi le défaut de bilan est attribué aux pertes gazeuses. Le bilan de masse a été effectué seulement pour les essais 1 de co-compostage de fumier de volaille et de broyat de déchets verts. Pour l'essai de co-compostage lisier de porc et de broyat de déchets verts, les jus d'écoulement ne pouvaient pas être mesurés dans les conditions de réalisation à la ferme. Le bilan de masse n'a donc pas été réalisé pour cet essai, car la non prise en compte des jus d'écoulement aboutirait à une mauvaise estimation du bilan. Le Tableau 8 présente un bilan de matières minérales (MM) excédentaire sur le site A et faible sur le site B. Un gain de MM sur le site A par une incorporation de terre lors des retournements, le compostage ayant lieu sur une surface non bétonnée, est probable. Le bilan est aussi excédentaire pour le phosphore sur les deux sites et pour le potassium sur le site B. Ce dernier est très mobile dans les jus d'écoulement, ainsi les variations de cet élément mettent en évidence de faibles pertes de matières par lessivage et lixiviation (résultats attendus du fait de la couverture des andains avec une bâche), ce qui valide sa conservation. En effet, dans la littérature des variations de P et K proches de 10% sont considérés comme convenables (Espagnol et al. 2006 ; Rafolisy et al. 2015). Cependant, P est un composé peu volatile et peu lessivable, or ses variations sur le site A (excédent de 95,7 %) et B (excédent de 77,7%), sont largement supérieures à 10%, rendant la validation de sa conservation problématique, à mettre en relation avec les approximations associées à l'estimation des masses de matières entrantes, la prise des échantillons pour les analyses, et la précision des analyses physico-chimiques. Le bilan des composés volatiles, les pertes de carbone organique et de matières organiques sont de même ordre de grandeur (40%), mettant en évidence une diminution de la MO principalement due à la minéralisation du carbone organique en dioxyde de carbone en conditions aérobies, ou en méthane ou acide gras volatile dans les zones anaérobies (Francou, 2003). Ces pertes sont cohérentes avec ce que l'on peut trouver dans la littérature sur d'autres types de composts, soit des pertes de carbone de 10 à 50% (Robin et al., 2018). Les pertes d'azote total sont de l'ordre de 40 % sur les sites A et B, avec des pertes importantes en azote ammoniacal, 72% sur le site A et 84% sur le site B. Les pertes d'azote total correspondent à ce que l'on peut trouver dans la

littérature sur le compostage de fumier de volaille avec des pertes de l'ordre de 30% et qui peuvent atteindre 50% de l'azote initial selon la nature des matériaux (Robin et al., 2018). Ces pertes sont majoritairement dues aux pertes d'azote ammoniacal (Robin et al., 2018). Ainsi sur les sites A et B les pertes d'azote ammoniacal représentent 60 et 45% de l'azote total éliminé.

Tableau 8 : Bilan de masse des composés volatiles et non volatiles (en kg) du processus de co-compostage de fumier de volaille et de broyat de déchets verts

	Composés non volatiles			Composés volatiles					
	MM	P	K	MS	MO	Corg	Ntot	Norg	N-NH ₄
Site A									
BDV	1506,9	17,1	68,1	5922,5	4415,6	2207,8	46,5	44,5	2
FV	1033,6	67,9	217,2	6181,6	5148	2574	303,6	208,7	71,8
Mélange initial	2610,2	88	273	10218,2	7608	3804	418	250,4	107
Co-compost final	3209,5	172,2	243,3	7717,5	4497,5	2248,8	222,3	222,4	29,6
Pertes	-599,3	-84,2	29,7	2500,7	3110,5	1555,2	195,7	28	77,4
Pertes (%)	-23	-95,7	10,1	24,5	40,9	40,9	46,8	11,2	72,3
Site B									
BDV	1506,9	17,1	68,1	5922,5	4415,6	2207,8	46,5	44,5	2
FV	326	24,2	44,4	2131,9	1805,9	902,9	117,6	62,9	45,8
Mélange initial	2107,8	47,9	154,4	7423,2	5315,4	2657,7	280,1	196,7	79,1
Co-compost final	2019,3	85,1	160,2	5170,9	3061,6	1530,8	157,5	157,3	12
Pertes	88,5	-37,2	-5,8	2252,3	2254,3	1126,9	122,6	39,4	67,1
Pertes (%)	4,2	-77,7	-3,8	30,3	42,4	42,4	43,8	20	84,8

5. Stabilité des co-composts et potentiel amendant

La caractérisation chimique de la matière organique est un indicateur du potentiel amendant des co-composts. Ce potentiel amendant peut être évalué à l'aide de trois indicateurs qui estiment la proportion de MO susceptible d'être incorporée durablement à la MO du sol et d'entretenir le stock de MO. Il s'agit de l'Indice de Stabilité Biochimique (ISB) (Linières, Djakovitch, 1993), associé au taux de carbone résiduel (Tr-CBM) (Robin, 1997) et de l'Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO). Ce dernier compile et remplace les deux premiers indicateurs, afin de mieux prendre en compte les nouveaux produits organiques disponibles aujourd'hui³. La valeur des trois indices des cinq andains de co-compost est présentée dans le Tableau 9. Globalement, Plus les indices de stabilité sont élevés et plus le produit à un potentiel amendant fort. La valeur de l'indicateur ISB nous donne un premier renseignement sur les co-composts produits. En effet, l'ISB des fumiers et des composts est généralement supérieur à 0,4, ce qui n'est pas le cas des co-composts B1 et A2 qui ont un ISB respectivement de 0,24 et 0,35 (Tableau 9). Au regard de cet indicateur le co-compost C1 est l'amendement le plus stable des cinq co-composts. Par ailleurs, au regard de l'ISMO, qui n'est disponible que pour 3 produits, le co-compost C1 a l'indice le plus élevé, mais il est de même ordre de grandeur que les co-composts A2 et B2, indiquant un potentiel humigène comparable. Ainsi, du fait de la nature des co-composts et des dynamiques de compostage différentes et donc de teneurs en MO distinctes, l'apport d'humus est plus important avec le co-compost B2 mais est minimal avec le co-compost B1 (Tableau 9).

³ https://wiki.aurea.eu/index.php/ISB/CBM_devient_ISMO

Tableau 9 : Caractérisation biochimique de la matière organique des andains de co-composts des essais 1 et 2 sur les sites A, B et C

Co-compost	A1	B1	A2	B2	C1
ISB (en proportion de MO)	0,45	0,24	0,35	0,40	0,53
Taux de carbone résiduel (en %MO)	42,4	32,3	-	-	-
ISMO (en %MO)	-	-	83	83,6	85,2
Apport de MO stable (en kg/tMB)	116*	83*	167**	270**	184**

*Calcul avec ISB ; ** Calcul avec ISMO

CONCLUSION

Cette étude a ainsi mis en évidence la possibilité de réaliser du co-compostage à la ferme avec le matériel courant disponible sur une exploitation, soit un tracteur (et godet) et une tonne à lisier. De plus, le co-compostage est réalisable à moindres coûts : le compostage étant possible au champ (pour les effluents solides) et les investissements étant restreints, une sonde de température et une bâche semi-perméable, représentent l'investissement minimum à effectuer. La bâche semi-perméable est importante dans les conditions climatiques de forte pluviométrie où le risque de lessivage et de lixiviation pendant le compostage est fort, comme ça peut être le cas dans le Sud et dans les Hauts de l'île. Dans ces conditions il est aussi conseillé de travailler si possible sur une plateforme bétonnée pour le compostage des effluents solides, afin d'avoir un meilleur confort de travail et de pouvoir effectuer les opérations nécessaires par tout temps. Compte tenu des quantités de matières traitées lors de ces essais et du matériel disponible, le temps de travail cumulé pour chaque andain est assez faible et varie entre 1 à 3 min/m³. La méthode de mise en andain du fumier de volaille et du broyat en mille feuilles avec un tracteur et un godet a permis un mélange homogène des intrants. Les ratios volumiques testés, 1 : 1 et 1 : 1,5, pour les co-composts à base de fumier de volaille, ont abouti à l'obtention d'un produit hygiénisé et conforme à la norme NF U44-051. Cependant, le volume d'incorporation du fumier de volaille dans le mélange a ses limites. En effet, l'apport de broyat de déchets verts ne doit pas trop être réduit si l'on souhaite atteindre la norme amendement organique et donc avoir un ratio C/N strictement supérieur à 8. De plus, dans des conditions climatiques avec une forte pluviométrie et une forte humidité, la diminution de la quantité de broyat et donc de l'effet structurant et poreux, pourrait ralentir la montée en température de l'andain. Il est donc conseillé de privilégier un ratio volumique de 1 :1,5 ou au maximum de 1 :2, lorsque le co-compostage est réalisé dans des conditions proches de nos conditions expérimentales, et un ratio volumique de 1 :1 dans des conditions climatiques plus sèches. Les essais ont aussi montré qu'au bout de 40 jours le co-compost de fumier de volaille et de broyat de déchets verts est conforme à la norme amendement organique. Le process pourrait donc être raccourci selon les besoins et objectifs de l'éleveur afin d'obtenir un compost jeune pré-humifié ; cependant le produit ne sera pas stabilisé et continuera d'évoluer. Ainsi, selon la durée du procédé et les quantités de matières apportées, les teneurs moyennes en pourcentage de matière brutes de N-P-K sont de 1,5-1,0-1,5, et de 40 à 60% pour la matière sèche et de 30 à 50% pour la matière organique.

Pour ce qui concerne le co-compost à base de lisier de porc, la méthode d'injection de lisier par étalement du broyat a permis l'obtention d'un co-compost hygiénisé conforme à la norme NFU 44-051. Il est important de noter que le mélange de lisier dans le broyat peut aussi être effectué en injectant le lisier sur une cuvette formée au sommet de l'andain. Cette deuxième option a été testée à l'occasion de deux essais réalisés en amont des essais CONVER par un groupe local, et a montré des limites lorsque le lisier est épais. Le ratio théorique 1 : 3 a pu être optimisé dans cet essai avec l'obtention d'un ratio 1 : 1,5 et pourrait être encore augmenté en utilisant du broyat frais (capacité d'absorption plus importante que du broyat déjà fermenté) et en allongeant le processus de quelques mois afin d'effectuer plus d'injections de lisier. Cependant, le co-compost obtenu se rapproche d'un compost de broyat de déchets verts et présente des caractéristiques agronomiques moins intéressantes que le co-composts de fumier de volaille et de broyat de déchets verts. Les teneurs en pourcentage de matière brutes de N-P-K sont de 0,8-0,5-0,8, et de 43% pour la matière sèche et de 27% pour la matière organique. L'impossibilité d'effectuer l'essai 2 sur le site C ne nous a pas permis de tester un nouveau protocole afin d'améliorer ces critères.

Quel que soit le type de co-compost en fabrication, les essais ont montré que l'hygiénisation de l'andain est rapide et que bien souvent la température se maintient à plus de 50°C après 3 mois de process, probablement du fait de la présence de matières encore dégradables dans le mélange notamment le broyat de déchets verts. Les retournements se sont avérés efficaces pour maintenir la température quand celle-ci était en baisse. Par ailleurs, les évolutions chimiques des co-composts au cours du processus de compostage sont cohérentes avec les évolutions communément observées pour d'autres composts. Ainsi, une augmentation de la matière sèche a lieu du fait d'une perte d'eau des andains. Et une diminution de la matière organique s'observe du fait de la minéralisation du carbone organique. Une perte d'azote total est aussi observée notamment par volatilisation de l'azote ammoniacal. Ces évolutions aboutissent à l'obtention d'un amendement organique peu riche (en comparaison avec des composts de fumier de volaille seul) mais dont l'ISMO, indique un fort potentiel humigène. Les pertes de masses et de volumes sont cohérentes avec la littérature (notamment pour les co-composts de fumier de volaille et de broyat de déchets verts), de l'ordre de 13 à 50% de la masse initiale et de 12 à 30% du volume initial. Le bilan de masse pour le potassium a pu être validé mais pas pour le phosphore, et ce bilan a mis en évidence des pertes de matières organiques et de carbone de l'ordre de 40% de la masse initiale, ainsi que des pertes d'azote du même ordre.

TESTS DES CO-COMPOSTS EN FERME : ESSAIS EN MARAICHAGE

INTRODUCTION

Le recyclage des effluents d'élevage en agriculture est une pratique ancienne, bien que, ce mode de fertilisation organique ait évolué à mesure des changements de systèmes et de pratiques d'élevage. Le 20^{ème} siècle a vu se développer l'utilisation abondante voire systématique, selon les systèmes de production et les régions, des engrais minéraux à la place de la fertilisation organique, en vue d'un apport maîtrisé d'azote, de phosphore et de potassium. Ces engrais, dont l'agriculture réunionnaise dépend fortement, sont importés et leur coût est en constante augmentation du fait du coût de l'énergie nécessaire à leur fabrication, du coût du transport et de la raréfaction des ressources minières (notamment du phosphore). Par ailleurs, il est, plus récemment, demandé aux agriculteurs de valoriser des matières organiques d'origine urbaine ou industrielle. Les matières organiques sur l'île sont de nature très diverse⁴ et leur utilisation est en augmentation, afin de pallier la forte dépendance aux engrais minéraux et d'accompagner le développement de l'agriculture biologique et de la transition agroécologique du territoire. L'utilisation de matières organiques en maraîchage est donc une pratique répandue à La Réunion mais elle reste encore à raisonner. En effet, afin de sécuriser leurs productions les agriculteurs tendent à appliquer des doses de fertilisants et de matières organiques bien supérieures aux besoins réels des cultures, pouvant entraîner des déséquilibres nutritionnels et des risques de pollution environnementaux (Chabalier et al., 2006). Pour aider au développement et améliorer l'usage de la fertilisation organique sur les surfaces maraîchères, un guide de la fertilisation organique a été élaboré (Chabalier et al., 2006), ainsi qu'un outil d'aide à la décision, Ferti-run, développé par la Chambre d'Agriculture et le Cirad (Van de Kerchove et al., 2018).

Cependant, étant donné la nature nouvelle des co-composts de fumier de volaille ou de lisier de porc en mélange avec du broyat de déchets verts, il est nécessaire de pouvoir juger de l'intérêt agronomique de ces produits et donc de leur valorisation possible en maraîchage et d'appréhender les pratiques d'utilisation des co-composts en maraîchage. L'objectif de cette étude est donc de tester à la ferme une fertilisation organique en cultures maraîchères à base des co-composts produits lors des essais de process technologique du projet CONVER. L'effet amendant des co-composts sur le sol ne seront pas étudiés car cette étude requiert de travailler sur un pas de temps beaucoup plus long.

Cette étude a été réalisée en collaboration avec l'Association Réunionnaise pour la Modernisation de l'Economie Fruitière, Légumière et HORTicole (Armeflhor) qui œuvre sur le territoire en tant qu'institut technique agricole.

⁴ 107 biomasses différentes ont été inventoriées dans la cadre du projet GABIR (Vigne et al., 2022)

MATERIELS ET METHODES

1. Parcelles expérimentales

Les essais ont été conduits sur culture de choux chez 3 maraîchers (parcelles A, B, C et D) entre 2021 et 2022. La parcelle B est une parcelle maraîchère en agriculture conventionnelle, alors que les parcelles A, C et D sont des parcelles en agriculture biologique. Initialement deux essais devaient être effectués chez deux maraîchers, mais un problème de santé d'un des deux agriculteurs, à la fin du premier essai, nous a conduit à abandonner notre collaboration au profit d'un autre agriculteur pour les essais 2 (parcelle C). Ainsi, les premiers essais maraîchage ont été réalisés sur des parcelles irriguées A et B, alors que les seconds essais ont été réalisés sur des parcelles non irriguées C et D (Figure 12). Les conditions de température et d'humidité sur chaque site ont été mesurées avec un Tiny-tag. Elles sont présentées en ANNEXE 2.

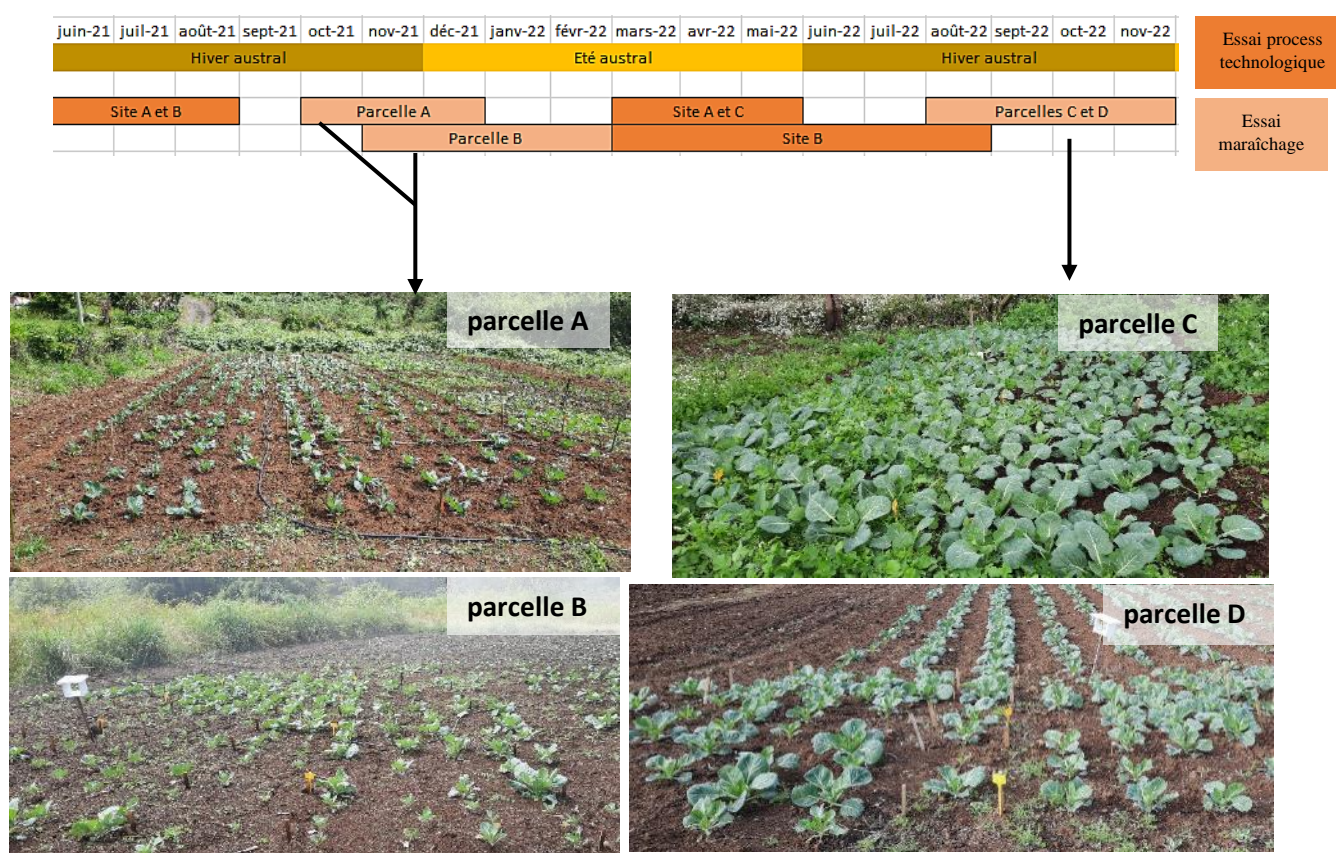


Figure 12 : Planning des essais maraîchage des parcelles expérimentales A, B, C, et D

Pour chacun des essais les caractéristiques des sols des deux parcelles étaient assez semblables, et seule une des deux parcelles par essai a eu un précédent cultural (Tableau 10). Ainsi, lors des essais 1, les deux parcelles A et B avaient un taux de matière organique élevé et des teneurs en azote correctes et en phosphore élevées. Cependant, sur la parcelle B la capacité d'échange cationique (CEC) était faible et peu saturée alors que sur la parcelle A, la CEC était moyenne est très saturée. Pour les essais 2, les deux parcelles C et D avaient un taux de matière organique très élevé ainsi qu'une CEC élevée et peu saturée. Cependant, les teneurs en phosphore et potassium des deux sols étaient faibles.

Tableau 10 : Caractéristiques des parcelles expérimentales

Parcelle	Analyse sol							Antécédent cultural	Fertilisation précédente
	MO	pH	CEC	N	P	K	oligo- éléments		
Essai 1									
A	très fort (et minéralisation normale)	acide	faible et peu saturée	correct	très fort (sol fixateur)	correct	correct mais risque de carence en Mn	friche	-
B	très fort (et minéralisation rapide)	correct	moyenne et très saturée	correct	très fort (sol fixateur)	fort	correct mais risque de carence en Mn	brocoli et choux (N-1) citrouille (N-2)	Fumier mouton
Essai 2									
C	très fort (et minéralisation normale)	acide	forte et peu saturée	faible	faible	faible	-	prairies (N-2)	rien depuis 2 ans
D	très fort (et minéralisation rapide)	acide	forte et peu saturée	correct	faible	faible	-	friche	-

2. Dispositif expérimental

Les essais 1 sur les parcelles A et B ont été réalisés avec des choux cabus blanc ‘Farao’, et les essais 2 sur les parcelles C et D ont été réalisés respectivement avec des choux cabus blanc ‘Drago’ et ‘Cœur de Bœuf’. Le dispositif expérimental mis en place sur les quatre parcelles est un dispositif en bloc de Fisher avec 3 blocs (Figure 13). Chaque unité expérimentale du dispositif était composée de 12 choux, séparées entre elles d’une zone tampon composée de deux rangées de choux. Le facteur étudié était la fertilisation avec 5 modalités pour les essais 1 (sur les parcelles A et B) et 3 modalités pour les essais 2 (sur les parcelles C et D) (Figure 13). L’objectif de l’essai 1 était de comparer les co-composts à trois témoins, un témoin négatif non traité (tnt), un témoin de référence organique correspondant à la pratique de l’agriculteur, nommé référence producteur (ref), et un témoin de référence engrais minéral ou commercial (engr).

L’objectif de l’essai 2 était de comparer les co-composts à la référence producteur (ref). Ainsi, les co-composts A1 et B1 de fumier de volaille et de broyat de déchets verts, issus des essais 1 de co-compostage sur les sites A et B, ont été utilisés pour l’essai 1 de maraichage. Les co-composts A2 contenant du fumier de volaille et C1 contenant du lisier de porc, issus des essais de co-compostage sur les sites A et C, ont été utilisés pour les essais 2 de maraichage. Toutes les matières fertilisantes ont été apportées au trou lors de la plantation (en mélangeant avec la terre). Les quantités de co-composts à apporter ont été estimées à l’aide de l’outil Ferti-run, afin de répondre à 100% des besoins des choux en N, P, K pour un rendement de 40t/ha, soit un apport efficace de 120-140-200 kg/ha d’azote-phosphore-potassium. Suivant les co-composts, les coefficients équivalent engrais utilisés pour déterminer la quantité de matière à apporter correspondaient au coefficient équivalent engrais du fumier de volaille chair, pour les co-composts contenant du fumier de volaille, et au coefficient équivalent engrais du compost de broyat de déchets verts, pour le co-compost contenant du lisier de porc, le coefficient équivalence engrais des co-composts produits lors des essais n’ont pas été déterminés. Un apport d’autres produits organiques était parfois nécessaire pour compléter les besoins. Les quantités de co-composts et d’autres fertilisants appliquées sont résumées dans le Tableau 11.

Par ailleurs, certaines modalités n'ont pas pu être testées : i) la modalité engrais commercial pour la parcelle E, l'apport n'ayant pu être réalisé par l'agriculteur, et ii) la modalité témoin sans traitement pour la parcelle D, du fait d'un défaut de compréhension du protocole, toutes les modalités de cette parcelle expérimentale ont reçu un apport d'engrais minéral en plus de la fertilisation prévue.

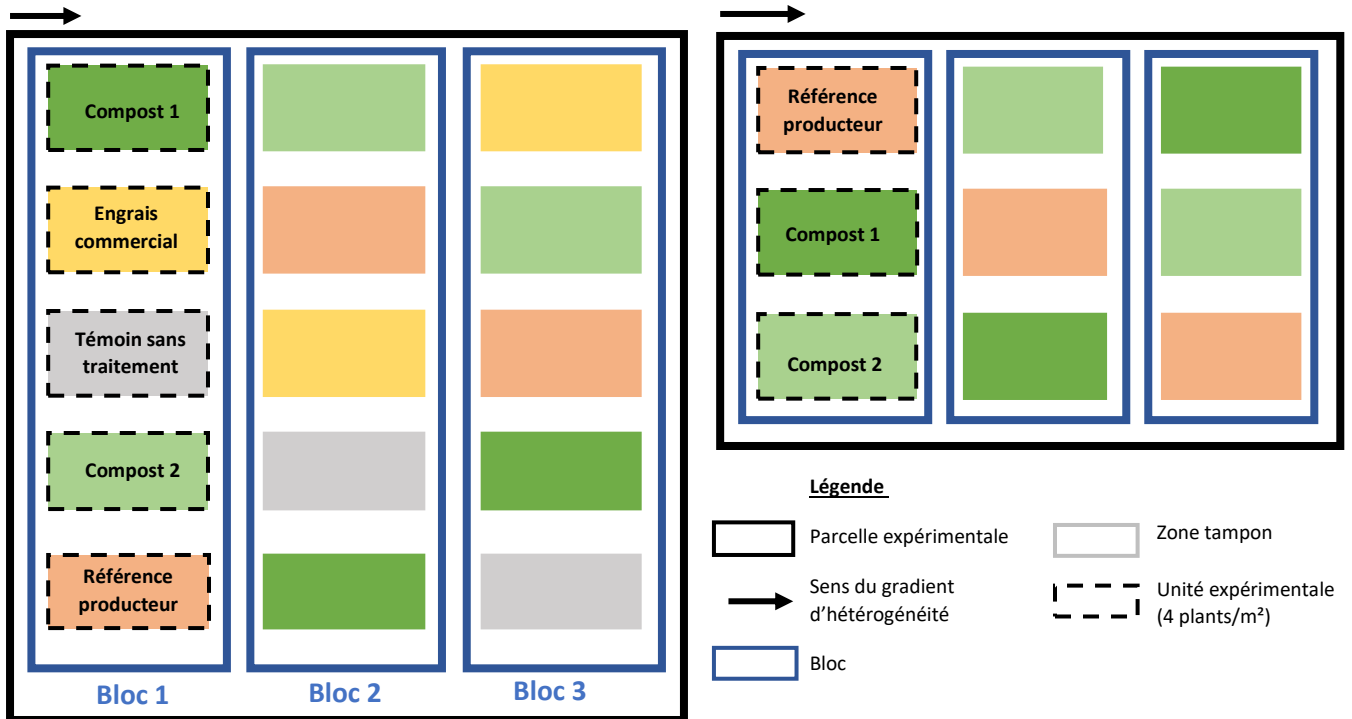


Figure 13 : Dispositif expérimental des essais 1 (sur les parcelles A et B) à gauche et des essais 2 (sur les parcelles C et D) à droite

Tableau 11 : Description des modalités du facteur fertilisation pour les essais 1 et 2. En gris : modifications involontaires du protocole par rapport au protocole initial.

Essai 1		
Parcelle	A	B
Fertilisation	Produit et dose (t/ha)	Produit et dose (t/ha)
Compost A1 (<i>comp_A1</i>)	Compost A1 : 14 ¹ Physalg 27 : 0,19	Compost A1 : 20,7 ¹ Physalg 27 : 0,03 ³ Engrais minéral : ~ 0,6
Compost B1 (<i>comp_B1</i>)	Compost B1 : 17,7 Physalg 27 : 0,34	Compost B1 : 15,7 Physalg 27 : 0,16 Engrais minéral : ~ 0,6
Engrais commercial (<i>engr</i>)	² Engrais Phenix : -	Engrais minéral : ~ 0,6
Témoin sans traitement (<i>tnt</i>)	-	Engrais minéral : ~ 0,6
Référence producteur (<i>ref</i>)	⁴ Mélange producteur : 52	⁵ Fumier de volaille : 25,7 Engrais minéral : ~ 0,6
Essai 2		
Parcelle	C	D
Fertilisation	Produit et dose (t/ha)	Produit et dose (t/ha)
Compost A2 (<i>comp_A2</i>)	Compost A2 : 25,4	Compost A2 : 25,4
Compost C1 (<i>comp_C1</i>)	Compost C1 : 35 ⁶ Guano marin : 0,54	Compost C1 : 48 ⁶ Guano marin : 0,37
Référence producteur (<i>ref</i>)	Compost A1 : 32	Compost A1 : 35,6

¹Physalg 27 (0-27-0) ;

²Engrais organique Phenix (6-8-15) ;

³Engrais minéral (15-12-24) ;

⁴Mélange de fumier de volaille et de compost de géranium (1-0.3-0.2) ;

⁵Fumier de volaille (1-3-1) ;

⁶Guano marin (12-9-2)

3. Mesures

Deux catégories de variables ont été mesurées durant ces essais, celles qui rendent compte de l'effet de la fertilisation sur la production de choux et celles qui rendent compte du cycle de la culture. Ainsi, une fois par semaine, tout au long du cycle, la vigueur des choux a été notée, de même que la date de pré-pomaison et de récolte. A la récolte, les choux ont été comptés puis pesés. A chaque récolte, les choux non commercialisables étaient distingués des choux commercialisables, c'est-à-dire des choux respectant les critères de qualité de la norme CEE-ONU FFV-09⁵. Globalement, les choux commercialisables sont des choux respectant un calibre minimum et ne présentant pas d'éclatement, de pourrissement avancé ou autres dégâts causés par des ravageurs des cultures.

4. Analyse statistique

L'influence de la fertilisation sur le poids des choux est le principal facteur étudié au travers des essais. Etant donné le dispositif expérimental (en bloc de Fisher), le facteur bloc est aussi étudié. L'analyse statistique permet alors de tester deux hypothèses, (i) H0 : la fertilisation et le bloc n'ont pas d'influence sur le poids des choux et (ii) H1 : la fertilisation et/ou le bloc ont une influence sur le poids des choux. Pour cela une analyse de variance à deux facteurs (Test de Chi2) suivie d'une comparaison multiple (Procédure de Tukey) ont été réalisées avec le logiciel R (version 4.1.0). L'analyse de variance permet de tester l'influence des deux facteurs et la comparaison multiple permet de comparer différentes modalités d'un facteur entres-elles, si le facteur a été testé positif lors de l'analyse de variance.

RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats présentés ici ne concernent que l'effet de la fertilisation sur les composantes de rendement.

1. Effet de la fertilisation sur les composantes du rendement (ESSAI 1)

Au cours de cet essai (notamment au début), des pertes ont été observées sur la parcelle expérimentale A. Elles concernent près de 9% des choux plantés, du fait principalement d'attaques des plants par une noctuelle, identifiée comme étant *Mamestra brassicae* la Noctuelle du chou. Des pertes ont aussi été observées sur la parcelle B, concernant 19 % des choux plantés, dues notamment au manque d'eau après la plantation (l'irrigation n'ayant pas été installée rapidement) et à des attaques de ravageurs défoliateurs. De plus, du fait d'un temps particulièrement pluvieux au moment de la récolte et de la non-disponibilité des agriculteurs (parcelle A), ainsi que du passage du cyclone Batsirai près des côtes de l'île de La Réunion (parcelle B), les récoltes ont été effectuées tardivement. Ceci a engendré un pourrissement avancé et/ou l'éclatement des choux, et donc des pertes et une part importante de choux non commercialisables. Par ailleurs, sur la parcelle expérimentale B, la quasi-totalité des choux des placettes 'engrais' et 'témoin sans traitement' n'ont pas formé de pommes et n'ont donc pas pu être récoltés. Un tiers seulement des choux de cette parcelle a été récolté, dont 73% étaient non commercialisables. Alors que, sur la parcelle expérimentale A, 76 % des choux ont été

⁵ https://unece.org/sites/default/files/2020-12/09_HeadedCabbage_0.pdf

récoltés dont 43% étaient non commercialisables. Du fait du non-respect du protocole initial, seul l'effet de la fertilisation organique a pu être testé sur la parcelle A, alors que l'effet d'une fertilisation mixte a pu être testé sur la parcelle B.

Ainsi, le rendement et le poids moyen de la récolte effectuée sur la parcelle A, pour chaque modalité, sont présentés dans le Tableau 12 ; étant donné la part importante de choux non commercialisables, le rendement commercialisable et le poids moyen des choux commercialisables y sont aussi présentés. Pour l'ensemble des modalités de la parcelle A le rendement total de la récolte correspond au rendement espéré, soit un rendement de 40 à 70t/ha. Les bons rendements des modalités non traitées, 'engr' et 'tnt' indiquent un sol déjà riche ayant fourni des éléments fertilisants aux cultures en plus des apports effectués. Les rendements les plus élevés sont obtenus avec les co-composts. Le rendement commercialisable est inférieur au rendement attendu du fait de la part importante de choux non commercialisables sur cette parcelle. Par ailleurs, le poids moyen des choux de cet essai est bien supérieur au poids moyen référence des choux cabus 'Farao', soit 1 à 1,5 kg (Tableau 12).

Tableau 12 : Rendement et poids moyen des choux récoltés et commercialisables sur la parcelle A (essai 1)

Modalités	Rendement (t/ha)	Poids moyen (kg)	Rendement commercialisable (kg)	Poids moyen commercialisable (kg)
comp_B1	70	2,35	38,4	2,60
comp_A1	68,4	2,20	32,5	2,66
engr*	54,3	1,95	28,3	2,3
ref	48,4	2,4	32,2	2,49
tnt*	55,7	1,93	46,3	2,08

* les modalités engr et tnt sont équivalentes car l'engrais n'a pas pu être apporté

L'analyse statistique a mis en évidence un effet de la fertilisation sur le poids total et le poids commercialisable des choux (Figure 14). Ainsi, sur la totalité des choux récoltés, ceux fertilisés avec le compost B1 ont un poids significativement plus important que les autres. Globalement, le poids moyen des choux fertilisés (modalités comp_B1, comp_A1, ref) est plus élevé que celui des choux non fertilisés (modalité engr et tnt) (Tableau 12).

Le poids des choux commercialisables, fertilisés avec les co-composts A1 et B1, est significativement plus important que celui des placettes témoin non traitées (Figure 14-2). Cependant, il n'y a pas de différence significative entre les modalités 'ref' et 'engr', d'une part, et les modalités comp_B1 et comp_A1, d'autre part (Figure 14-2). En termes de classement, le poids moyen le plus important est obtenu pour les choux fertilisés avec des co-composts, il est intermédiaire pour les choux des modalités 'engr' et 'ref', et plus faible pour les choux des modalités 'tnt'. Aucune différence significative n'a été mise en évidence, entre les cinq modalités, pour les choux non commercialisables. Par ailleurs, un effet bloc a été observé sur la parcelle E, les choux du bloc 3 ont significativement un poids plus faible que les choux des autres blocs. Une hétérogénéité de la parcelle est donc mise en évidence sur ce site qui peut s'expliquer par un non-travail du sol du bloc 3 par l'agriculteur avant la mise en place de l'essai.

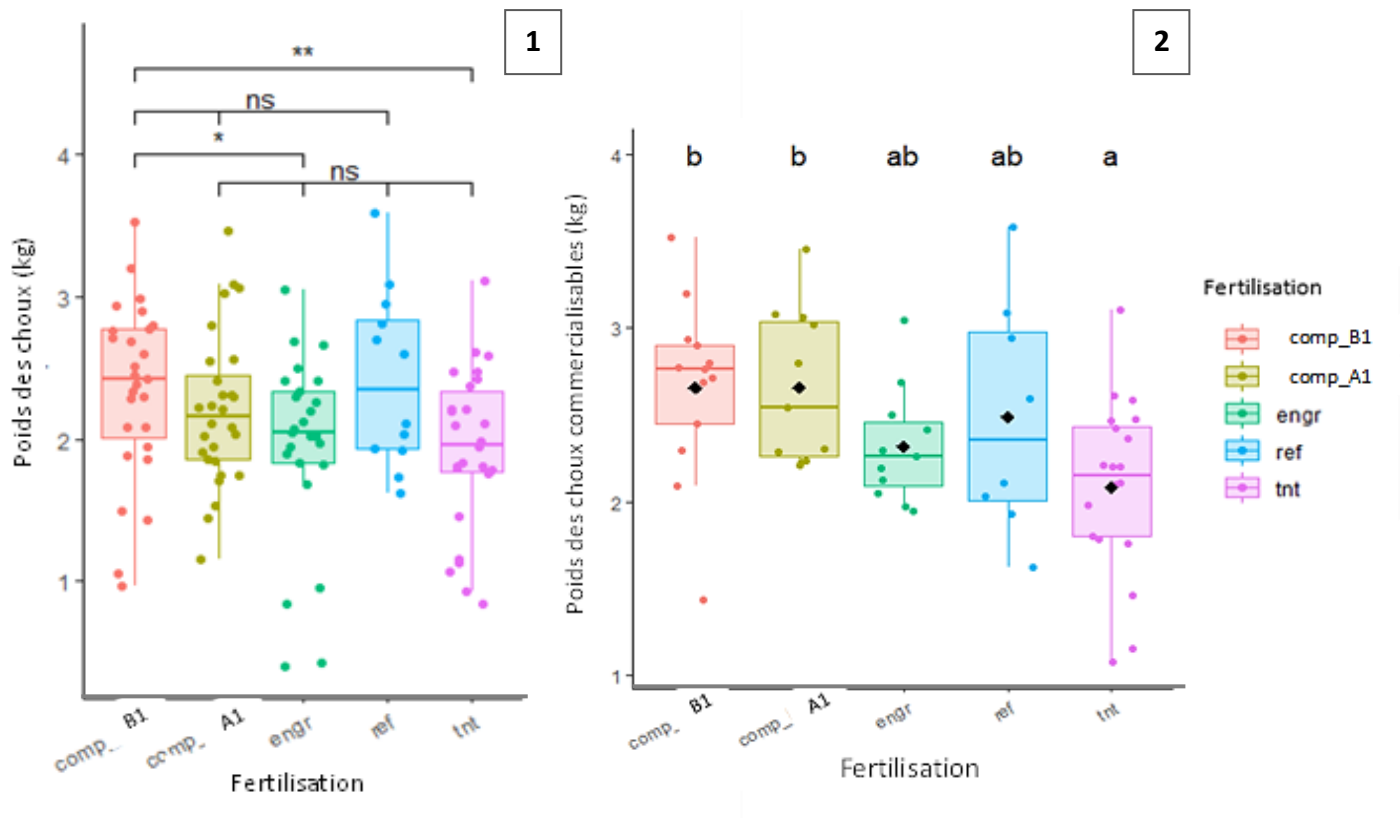


Figure 14 : Effet de la fertilisation sur 1) le poids total des choux de la parcelle A. Le test statistique global étant significatif un test de comparaison multiple a été effectué, * = p-valeur du test < 0.05, ns = p-valeur du test > 0.05 ; 2) le poids des choux commercialisables de la parcelle A. Le test statistique global étant significatif un test de comparaison multiple a été effectué. Les modalités dont les lettres sont différentes ont un poids significativement différent.

comp_B1 = compost B1 ; comp_A1= compost A1 ; engr = engrais non traité ; ref = Référence producteur ; tnt = témoin non traité.

Sur la parcelle B, un seul chou pour chacune des modalités 'engr' et 'tnt' a été récolté (le poids était inférieur à 500 g) car la pomaison du reste des choux de ces modalités n'a pas été observée. De plus, un apport d'engrais minéral a été effectué sur l'ensemble des placettes en plus de la fertilisation déjà prévue. Ainsi, le Tableau 13 présente le rendement et le poids moyen total et commercialisable des choux de la parcelle B pour chaque modalité. On observe, que le rendement espéré de 40 à 70 t/ha est presque atteint pour les modalités 'ref' et 'comp_B1', alors qu'il est bien inférieur pour la modalité 'comp_A1'. Cette dernière modalité présente le rendement le plus faible par rapport aux deux autres modalités. Le rendement total et commercialisable est plus faible que ce qui a été obtenu sur la parcelle A malgré l'ajout d'engrais minéral, et il en est de même pour le poids moyen des choux. Néanmoins, le poids moyen des choux de cet essai est supérieur au poids moyen de référence de la variété 'Farao', soit 1 à 1,5 kg (Tableau 13).

Tableau 13 : Rendement et poids moyen des choux récoltés et commercialisables sur la parcelle B (essai 1)

Modalités	Rendement (t/ha)	Poids moyen (kg)	Rendement commercialisable (kg)	Poids moyen commercialisable (kg)
comp_B1 + min	38,7	1,74	18,4	2,37
comp_A1 + min	22,6	1,85	7,0	3,47
ref + min	38,3	1,81	19,9	3,59
engr	-	-	-	-
tnt + min	-	-	-	-

L'analyse statistique a montré un effet de l'interaction de la fertilisation et du bloc sur le poids des choux (Figure 15). En effet, les choux du bloc 1 fertilisés avec de l'engrais minéral et de la matière organique, notamment le compost A1 et la modalité référence producteur, ont un poids plus important que les choux du bloc 2 et 3. Dans l'ensemble, les modalités comp_B1, comp_A1 et ref sont assez semblables. Aucune différence significative n'a été mise en évidence sur le poids des choux commercialisables et non commercialisables.

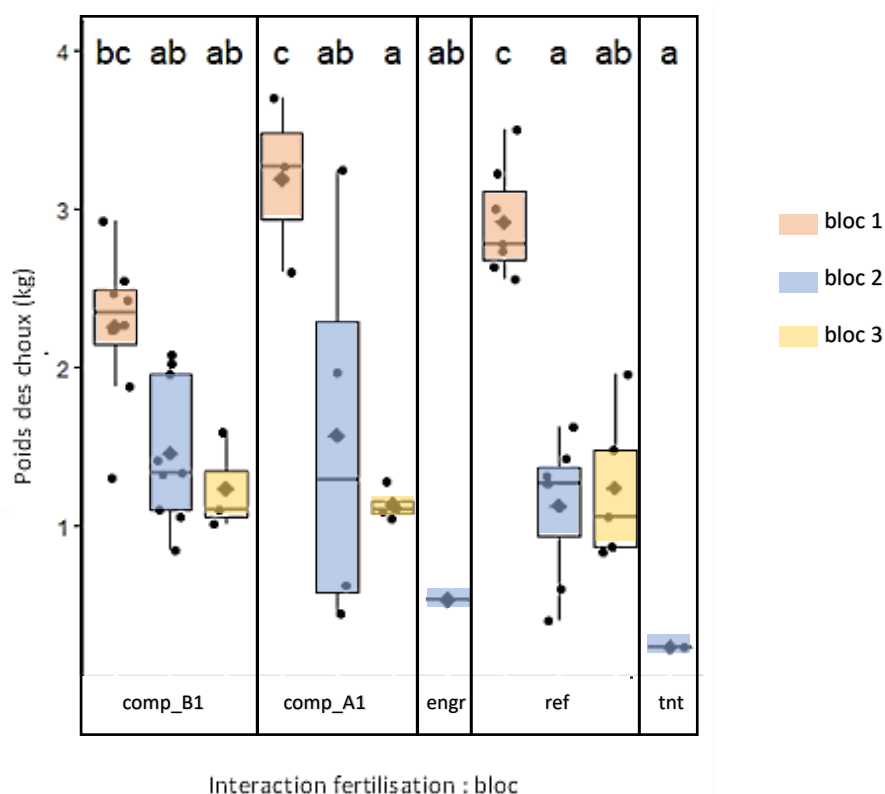


Figure 15 : Effet de l'interaction fertilisation et bloc sur les poids des choux de la parcelle B. Le test statistique global étant significatif un test de comparaison multiple a été effectué, les modalités dont les lettres sont différentes ont un poids significativement différent. comp_B1 = compost B1 ; comp_A1 = compost A1 ; engr = engrais ; ref = référence producteur ; tnt = témoin non traité. Toutes ces modalités ont reçu un apport d'engrais minéral.

Les apports efficaces en éléments fertilisants sur les parcelles A et B sont distincts sur les deux sites et d'une modalité à l'autre (Tableau 14). Ainsi sur le site B, les quantités d'azote, de phosphore et de potassium efficaces (apportées par la matière organique et l'engrais minéral) sont près de deux fois supérieures aux besoins des choux pour les modalités référence producteur, et les co-composts A1 et B1. Alors que pour la modalité engrais, les apports en éléments fertilisants ont été bien inférieurs au besoin des choux.

Tableau 14 : Apport d'azote, de phosphore et de potassium efficace sur les parcelles A et B en fonction des différentes modalités de fertilisation (essai 1)

Modalité	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
Parcelle A			
référence producteur	254	106	111
compost A1	120	140	272
compost B1	120	140	245
Parcelle B			
référence producteur	226	213	213
compost A1	210	212	434
compost B1	210	212	428
engrais	90	72	144
Besoin des choux	120	140	200

Malgré ces apports, la fertilisation n'a pas permis d'atteindre le rendement souhaité de 40t/ha. On peut donc supposer que sur la parcelle B, malgré un sol correctement pourvu en éléments fertilisants, un défaut d'irrigation au démarrage combiné à un effet bloc ont abouti à une réponse moindre des plants à la fertilisation. Sur la parcelle A, la quantité d'azote apportée par la modalité référence producteur est deux fois plus élevée que la quantité d'azote apportée par les co-composts (permettant une couverture des besoins en azote des choux). On observe néanmoins, avec cet essai, que le surplus d'azote apporté avec la modalité référence producteur, n'a pas eu significativement plus d'impact sur le poids des choux récoltés. Cependant, les quantités de phosphore et de potassium apportées ont été 1,3 à 2 fois inférieures aux besoins des choux. Par ailleurs, les rendements supérieurs à 40t/ha obtenus à la suite des différents niveaux d'apport, mettent en évidence un apport optimal d'éléments nutritifs à la plante probablement lié à un sol correctement pourvu en éléments majeurs dès l'implantation de la culture (Tableau 10).

2. Effet de la fertilisation sur les composantes du rendement (ESSAI 2)

Des attaques de noctuelles ont été observées au début de l'essai 2 principalement sur la parcelle D causant près de 14% de pertes de plants. Sur cette même parcelle des dégâts de teignes ont aussi été observés en fin de cycle. Sur les choux restant 90 % ont été récoltés dont 88% étaient commercialisables. Les 12% de choux non commercialisables correspondent à des choux dont la pomme était trop petite, son poids étant inférieur à 500g. Sur la parcelle C, 2 % seulement de pertes ont été observées du fait de la non-irrigation des parcelles. Sur les choux restant 95% des choux ont été récoltés dont 95% sont commercialisables. Les pertes observées sur les deux sites sont faibles et sont inférieures aux pertes observées pendant l'essai 1. Par ailleurs, la quasi-totalité des choux récoltés pendant ces essais était commercialisable contrairement à ce qui a été obtenu lors de l'essai 1.

Ainsi, le rendement et le poids moyen des récoltes effectuées sur la parcelle C sont présentés dans le Tableau 15 pour chaque modalité. On observe que le rendement espéré, soit 40 à 70t/ha, est atteint pour chaque modalité et est supérieur aux rendements observés sur les parcelles A et B pendant les essais 1. De plus, le rendement le plus élevé est obtenu pour la modalité référence producteur. Les modalités des deux co-compost C1 et A2 ont un rendement assez comparable. Le poids moyen des choux est cependant inférieur à ce qui a été obtenu pendant l'essai 1, mais correspond au poids moyen référence de la variété utilisée 'Drago', soit 1,5 à 2,5 kg (Tableau 14). Le poids moyen le plus élevé est obtenu pour la modalité compost A2 et le plus faible pour

le compost C1. La référence producteur est intermédiaire. Les choux des trois modalités semblent avoir globalement bien répondu à la fertilisation par les co-composts.

Tableau 15 : Rendement et poids moyen des choux récoltés et commercialisables sur la parcelle C (essai 2)

Modalités	Rendement (t/ha)	Poids moyen (kg)
comp_C1	63,5	1,63
comp_A2	64,7	1,94
ref	71,8	1,80

Par ailleurs, l'analyse statistique a montré un effet de l'interaction de la fertilisation et du bloc sur le poids des choux (Figure 16). Ainsi, les choux du bloc 3 ont un poids plus faible que ceux des autres blocs, pour les composts A2 et la référence producteur. Pour le compost C1, le poids plus faible est observé sur le bloc 2. Dans l'ensemble il n'y a pas de différence significative du poids des choux entre les modalités compost C1, compost A2 et référence producteur, malgré la différence de poids moyen entre modalités. Etant donné les faibles teneurs du sol en azote, phosphore et potassium à l'implantation de la culture (Tableau 10), les résultats observés semblent être principalement liés à l'effet fertilisant des trois matières organiques utilisées.

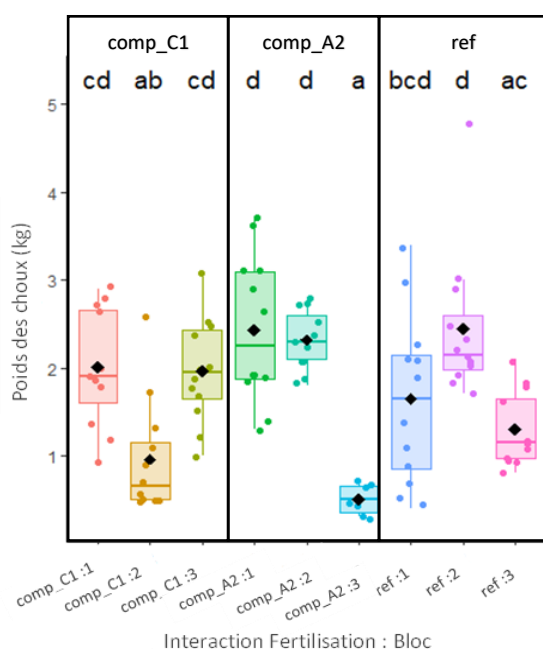


Figure 16 : Effet de l'interaction fertilisation et bloc sur les poids des choux de la **parcelle C**. Le test statistique global étant significatif un test de comparaison multiple a été effectué, les modalités dont les lettres sont différentes ont un poids significativement différent.

comp_C1 = compost C1 ; comp_A2 = compost A2 ; ref = référence producteur.

Pour ce qui concerne la parcelle D, les rendements obtenus sont nettement inférieurs à ce qui est attendu dans le cas des modalités comp_C1 et comp_A2 (Tableau 16). Les rendements de ces deux modalités sont comparables. Seule la modalité référence producteur a permis d'atteindre le rendement de 40 t/ha. Par ailleurs, aucune des modalités n'a permis d'atteindre le poids moyen attendu de la variété 'Cœur de Bœuf', soit, 1,5 à 2 kg (Tableau 16). Ces résultats mettent en évidence un défaut de réponse des choux à la suite de la fertilisation notamment pour les modalités co-composts C1 et A2.

Tableau 16 : Rendement et poids moyen des choux récoltés et commercialisables sur la **parcelle D** (essai 2)

Modalités	Rendement (t/ha)	Poids moyen (kg)
comp_C1	27,6	0,83
comp_A2	26,1	0,98
ref	42,9	1,25

Tout comme sur la parcelle C, l'analyse statistique a mis en évidence un effet de l'interaction de la fertilisation et du bloc sur le poids des choux de la parcelle D (Figure 17). Ainsi, les choux fertilisés avec les modalités comp_C1 du bloc 1, comp_A2 du bloc 3 et ref du bloc 1, ont un poids moyen plus important que les autres choux. Les choux des autres placettes ref et comp_A2 ont un poids moyen comparable, alors que la modalité comp_C1 du bloc 3 présente des choux avec le poids moyen le plus faible. Les choux ayant le poids le plus élevé sont ceux présents sur la placette ref du bloc 1.

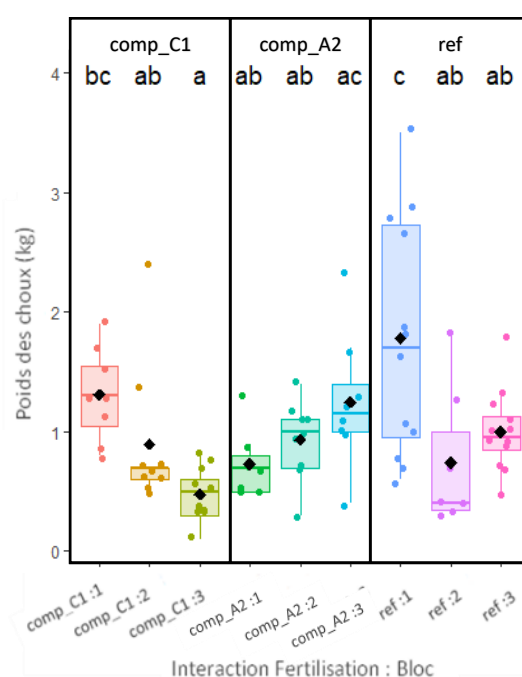


Figure 17 : Effet de l'interaction fertilisation et bloc sur les poids des choux de la parcelle D. Le test statistique global étant significatif un test de comparaison multiple a été effectué, les modalités dont les lettres sont différentes ont un poids significativement différent. comp_C1 = compost C1 ; comp_A2 = compost A2 ; ref = référence producteur.

Les apports efficaces en éléments fertilisants sont distincts sur les parcelles C et D et d'une modalité à l'autre (Tableau 17). Ainsi sur la parcelle C, les quantités d'azote, de phosphore et de potassium efficaces apportées par la matière organique sont supérieures aux besoins des choux pour la modalité référence producteur. Pour les co-composts C1 et A2, les apports sont supérieurs pour le phosphore et le potassium. Ces apports ont donc permis d'atteindre le rendement souhaité sur l'ensemble des placettes avec un rendement et un poids moyen plus important pour les modalités référence producteur et compost A2.

Tableau 17 : Apport d'azote, de phosphore et de potassium efficace sur les parcelles C et D en fonction des différentes modalités de fertilisation (essai 2)

Modalité	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
Parcelle C			
référence producteur	179	225	489
compost C1	120	131	291
compost A2	120	158	254
Parcelle D			
référence producteur	163	205	445
compost C1	120	148	391
compost A2	120	158	254
Besoin des choux	120	140	200

De même, sur la parcelle D, les apports en éléments majeurs sont supérieurs aux besoins de la culture. Cependant, la réponse à la fertilisation a été moindre, puisque ni le rendement attendu ni le poids moyen théorique n'ont été atteints, sauf pour la modalité référence producteur dans le cas du rendement. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce résultat, le manque d'irrigation et les attaques de noctuelles ayant pu affaiblir les plants, ainsi qu'un sol pauvre en éléments nutritifs et une minéralisation faible de la matière organique n'ayant pas permis un apport en élément suffisant. Par ailleurs, deux variétés différentes ont été utilisées durant ces essais, un effet variétal peut aussi être en cause.

CONCLUSION

Les co-composts produits lors des essais process technologique ont été testés, dans cette étude, en tant que fertilisant organique. Ces essais ont mis en évidence un effet positif de l'apport de matière organique (associé ou non à de l'engrais minéral) sur le poids des choux et le rendement de la récolte. En effet, sur les parcelles dont le sol a une teneur en azote phosphore et potassium faible à forte ainsi qu'une CEC moyenne à forte (parcelles A et C), la fertilisation organique à base de co-composts, couvrant les besoins des choux en azote, s'est révélée aussi efficace que la fertilisation référence producteur. Les rendements espérés et le poids moyen théorique de la variété ont ainsi pu être atteints, mettant en évidence l'intérêt fertilisant des co-composts. Bien qu'aucune différence significative n'ait été notée entre les co-composts et la référence producteur, il semble néanmoins que les co-composts B1 et A2 aient permis un rendement et un poids moyen relativement plus important. Par ailleurs, les résultats mettent aussi en évidence qu'une fertilisation supérieure aux besoins des choux ne permet pas forcément un gain plus important sur le rendement ou le poids des choux.

Cependant, sur d'autres parcelles (B et D) l'effet fertilisant des co-composts a été mitigé. En effet, les quantités apportées, bien que couvrant les besoins de la culture, n'ont pas permis d'atteindre le rendement espéré ni le poids moyen théorique de la variété utilisée. Plusieurs facteurs liés aux conditions expérimentales peuvent être en cause, dont une faible voire un manque d'irrigation au début et tout au long de la culture, un impact du travail et de la fertilité initiale du sol ainsi qu'une minéralisation ou une disponibilité des éléments insuffisante liée aux caractéristiques de la matière organique. Ainsi, la fertilisation effectuée dans le cadre de ces essais aurait permis d'entretenir la fertilité chimique du sol déjà bien pourvu, d'où un léger effet du compost sur le poids des choux.

Ces éléments sont donc à prendre en compte pour l'utilisation des co-composts en maraîchage et montrent les limites de l'usage d'un amendement organique en tant que produit fertilisant. En effet, du fait de leur nature les co-composts vont améliorer dans un premier temps la fertilité chimique, physique et biologique du sol et auront indirectement un impact sur la nutrition des plantes. La réorganisation des éléments pendant le processus de compostage peut permettre une minéralisation plus ou moins rapide de l'azote et une disponibilité du phosphore et du potassium directement au profit de la plante. Néanmoins, cette nutrition directe de la plante dépend fortement du type de co-compost et de ses interactions dans le sol.

TESTS DES CO-COMPOSTS EN FERME : ESSAIS SUR PRAIRIES

INTRODUCTION

Les conditions pédoclimatiques sur l'île de La Réunion permettent une production et une valorisation de l'herbe toute l'année. Les prairies peuvent produire de 18 à 35 t de MS/ha/an, selon les secteurs et les espèces, si l'exploitation est régulière et la fertilisation adaptée (Blanfort, 1998; Mandret et al., 2000; Thomas et al., 2004; Leleux, 2016). Ce niveau élevé de rendement est cependant peu observé dans les élevages du fait d'une sous valorisation des prairies et des pratiques de fertilisation peu adaptées (Leleux 2016; Miralles-Bruneau, Pierre, et al. 2022). Ainsi, les rendements valorisés seraient de l'ordre de 6 à 8 t de MS/ha/an pour les prairies pâturées et de 10 à 12 t de MS/ha/an pour les prairies de fauche. Une étude a mis en évidence (i) que très peu d'éleveurs raisonnent la fertilisation des prairies, les niveaux d'apport n'étant pas connus, et (ii) que la fertilisation minérale concerne la moitié des élevages allaitants et laitiers, alors que la fertilisation organique concerne en grande majorité les élevages laitiers selon ce qui est disponible sur l'exploitation et dans le voisinage (Miralles-Bruneau et al., 2022). Des travaux ont déjà été menés pour définir les pratiques de fertilisation adaptées aux espèces fourragères et aux contextes pédoclimatiques locaux (Blanfort, 1998; Mandret, et al., 2000), mais à ce jour aucune étude n'a porté sur l'utilisation des co-composts d'effluent d'élevage et de broyat de déchets verts.

Etant donné la nature nouvelle du co-compost de fumier de volaille ou de lisier de porc en mélange avec du broyat de déchets verts, il est important de pouvoir juger de l'intérêt agronomique de ces produits et donc de leur valorisation possible en prairie. L'objectif de ce travail est donc de tester à la ferme une fertilisation organique sur prairies avec les co-composts produits lors des essais de processus technologique du projet CONVER. L'effet amendant de la fertilisation à base de co-compost sur la fertilité du sol ne sera pas étudié.

Cette étude a été réalisée en collaboration avec l'Association Réunionnaise de Pastoralisme (ARP) qui œuvre sur le territoire en tant qu'organisme de conseil et de développement agricole spécialisé dans les systèmes fourragers.

MATERIELS ET METHODES

1. Parcelles expérimentales

Les essais de tests des co-composts sur prairies ont été réalisés sur des prairies de fauche, parcelles A et B, situées à 1180 m d'altitude, sur un cycle de 5 à 6 fauches (Figure 18). Les pratiques de production de fourrages des éleveurs ont aussi été caractérisées. Ainsi, les deux éleveurs ne fertilisent pas leur parcelle. La production de fourrage a été estimée à 16,8 t de MS/ha/an et 11 t de MS/ha/an, sur respectivement les parcelles A et B. Il faut noter que sur la parcelle A, l'éleveur produit son fourrage à destination de maraîchers pour une utilisation en paillage. De ce fait, la pratique de production de l'éleveur est orientée de manière à favoriser une biomasse importante sans considération de la valeur alimentaire du fourrage produit. Alors

que sur la parcelle B, la production de fourrages est à destination d'autres éleveurs, l'herbe est donc coupée avant épiaison afin de garantir une valeur alimentaire des fourrages et une production de biomasse satisfaisantes.

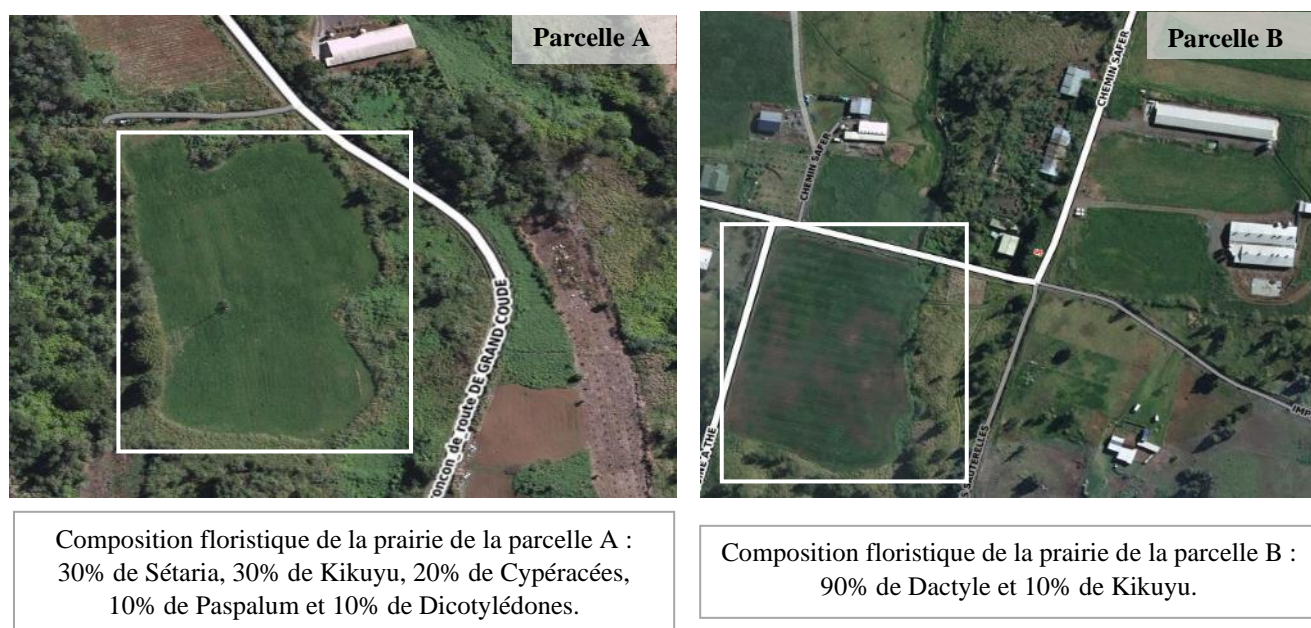


Figure 18 : Sites expérimentaux et composition floristique des sites. Encadré blanc = parcelle expérimentale.

Les propriétés chimiques des sols et l'indice de nutrition des parcelles ont été caractérisés seulement sur la parcelle A. Un changement de parcelle et un temps de traitement élevé de l'analyse de sol ne nous ont pas permis d'effectuer l'analyse de sol et l'indice de nutrition sur la parcelle B. Les résultats d'analyse de sol et l'indice de nutrition de la parcelle A sont présentés dans le Tableau 18. Une carence en azote et potassium est ainsi mise en évidence, alors que la teneur en phosphore est satisfaisante, du fait d'un sol très fixateur en phosphore. L'analyse de sol met aussi en évidence un taux de matière organique dans le sol très élevé, un pH et un taux d'azote satisfaisants, à entretenir via une fumure, une CEC faible et peu saturée ainsi qu'un taux de potassium dans le sol faible.

Tableau 18 : Caractéristiques des sols sur la parcelle A

Site	MO	pH	CEC	N	P	K	oligo-éléments
A	très fort (et minéralisation rapide)	correct	faible et peu saturée	correct	très fort (sol fixateur)	faible	-

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental mis en place sur les deux parcelles est un dispositif en bloc de Fisher à deux répétitions. Le facteur étudié est la fertilisation avec 6 modalités sur la parcelle A et 4 modalités sur la parcelle B (Figure 19). Ainsi, sur la parcelle A, des doses croissantes de co-compost associées à une fertilisation minérale sont comparées à une fertilisation exclusivement minérale ou exclusivement à base de co-compost et un témoin sans traitement. Alors que sur la parcelle B, des doses croissantes de co-compost seules sont comparées à un témoin sans traitement. Les co-composts A1 et B1, testés respectivement sur les parcelles A et B, sont issus des essais 1 de process technologique qui se sont déroulés sur les sites A et B. Les quantités de co-compost et d'engrais utilisées sur chaque parcelle ont été appliquées à la volée sur l'ensemble des placettes à la suite d'une fauche, et sont résumées dans le Tableau 19. Sur la parcelle A, l'essai a concerné le suivi de 6 fauches dont la fauche de référence, mais seulement 5 fauches ont pu être analysées. Et sur la parcelle B, 5 fauches dont la fauche de référence ont pu être réalisées et analysées.

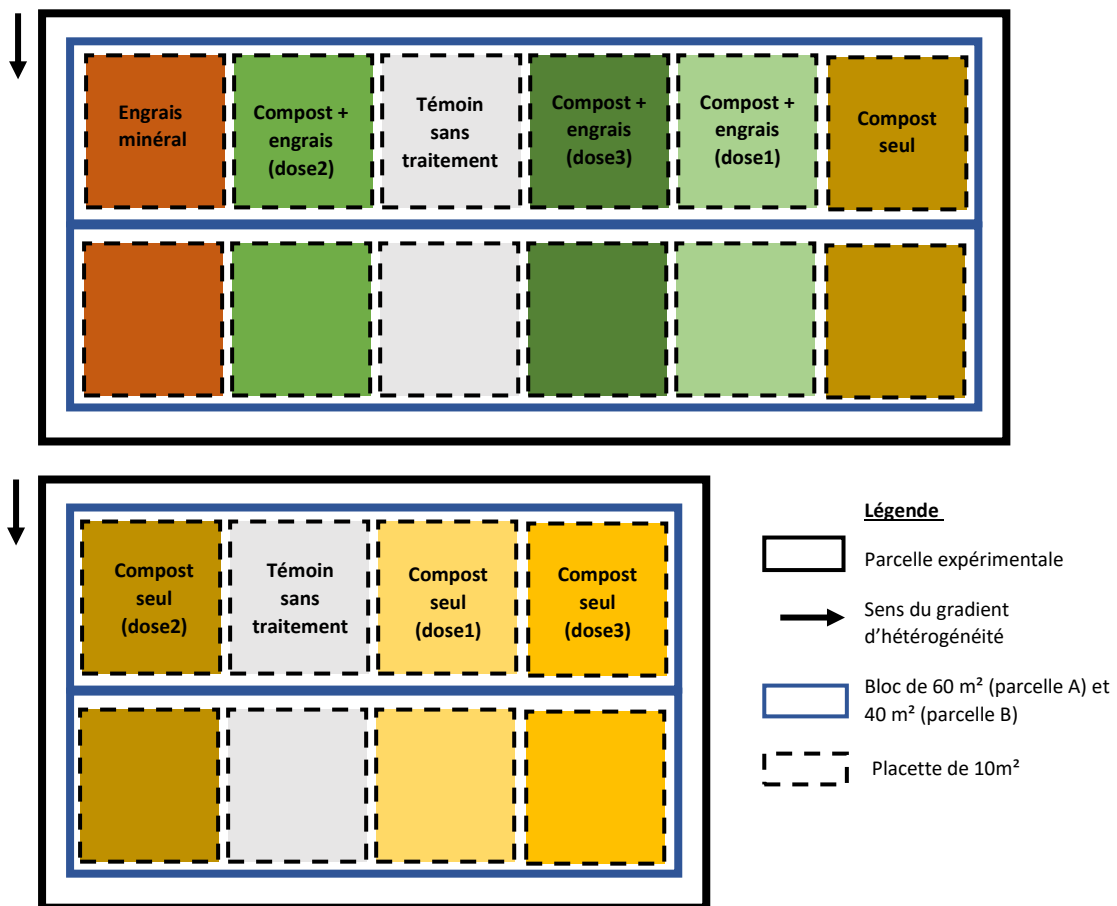


Figure 19 : Dispositif expérimental des essais prairies sur la parcelle A (en haut) et la parcelle B (en bas)

Tableau 19 : Description des modalités du facteur fertilisation des essais prairies sur les parcelles A et B

Parcelle A						
N° fauche	Témoin	Co-compost A1 + engrais – C5E dose 1 (t/ha)	Co-compost A1 + engrais – C10E dose 2 (t/ha)	Co-compost A1 + engrais – C15E dose 3 (t/ha)	Engrais minéral – EM (t/ha)	Co-compost A1 seul – C10 (t/ha)
Référence	-	Compost : 5 Urée 46% : 0.124	Compost : 10 Urée 46% : 0.106	Compost : 15 Urée 46% : 0.087	Urée 46% : 0.143	Compost : 10
Fauche 1	-	Urée 46% : 0.143	Urée 46% : 0.143	Urée 46% : 0.143	Urée 46% : 0.114 *MAP : 0.115 **KCL : 0.334	-
Fauche 2	-	Compost : 5 Urée 46% : 0.124	Compost : 10 Urée 46% : 0.106	Compost : 15 Urée 46% : 0.087	Urée 46% : 0.143	Compost : 10
Fauche 3	-	Urée 46% : 0.143	Urée 46% : 0.143	Urée 46% : 0.143	Urée 46% : 0.114 *MAP : 0.115 **KCL : 0.334	-
Fauche 4	-	Urée 46% : 0.143	Urée 46% : 0.143	Urée 46% : 0.143	Urée 46% : 0.143	-
Fauche 5	-	-	-	-	-	-
Parcelle B						
	Témoin	Co-compost B1 – C5 dose 1 (t/ha)	Co-compost B1 – C10 dose 2 (t/ha)	Co-compost B1 – C15 dose 3 (t/ha)		
Référence	-	Compost : 5	Compost : 10	Compost : 15		
Fauche 1	-	Compost : 5	Compost : 10	Compost : 15		
Fauche 2	-	Compost : 5	Compost : 10	Compost : 15		
Fauche 3	-	Compost : 5	Compost : 10	Compost : 15		
Fauche 4	-	-	-	-		

*MAP : Phosphate Monoammonique (12% N, 52% P) ; **KCL : Chlorure de potassium (30% de K)

3. Mesures et prélèvements

A chaque coupe, une bande de largeur d'un mètre est fauchée au milieu de chaque placette expérimentale avec une motofaucheuse, sur toute la longueur, soit sur une surface de 5 m². L'herbe ainsi coupée est pesée puis un échantillon moyen de 300-500 g est prélevé pour analyser la valeur alimentaire du fourrage et mesurer son taux de matière sèche, via la spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR). Le rendement après chaque coupe est aussi mesuré et le gain ou la perte de rendement par rapport à la fauche de référence est calculé.



Figure 20 : 1) Photo de la motofaucheuse ; 2) Placette expérimentale fauchée avec la motofaucheuse ; 3) Echantillons élémentaires de chaque placette

4. Analyse statistique

L'influence de la fertilisation sur le rendement de la prairie est le principal facteur étudié au travers de cet essai. Etant donné le dispositif expérimental (en bloc de Fisher), le facteur bloc est aussi étudié. L'analyse statistique permet alors de tester deux hypothèses, (i) H0 : la fertilisation et le bloc n'ont pas d'influence sur le rendement et (ii) H1 : la fertilisation et/ou le bloc ont une influence sur le rendement. Pour cela un modèle linéaire mixte (Test de Chi2) suivi d'une comparaison multiple (Procédure de Tukey) ont été réalisés avec le logiciel R (version 4.1.0). Le modèle linéaire mixte permet de tester l'influence du facteur en tenant compte des mesures répétées réalisées sur les placettes et la comparaison multiple permet de comparer différentes modalités d'un facteur entre-elles, si le facteur a été testé positif lors de la précédente analyse.

RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats présentés ici ne concernent que l'effet de la fertilisation sur le rendement des prairies

1. Effet d'une fertilisation minérale et organique à base de co-compost sur une prairie de fauche (Parcelle A)

Sur la période d'essai, allant de décembre 2021 à octobre 2022, un total de 533,4 kg d'herbe a été récolté sur la parcelle expérimentale. Une évolution saisonnière du rendement moyen de chaque fauche (modalités et blocs confondus) a été observée (Figure 21), les deux saisons (sèche et pluvieuse) étant bien marquées sur l'île. Ainsi, de décembre à mars, le rendement moyen de chaque fauche augmente du fait de conditions favorables à la pousse de l'herbe, soit des températures chaudes et une pluviométrie élevée, typiques de la saison des pluies. Alors que, de mai à septembre, le rendement moyen diminue du fait de l'installation de la saison sèche, où les températures et la pluviométrie sont faibles. Ces évolutions correspondent à ce qui est communément observé sur l'île (Miralles-Bruneau, Pellier, et al. 2022).

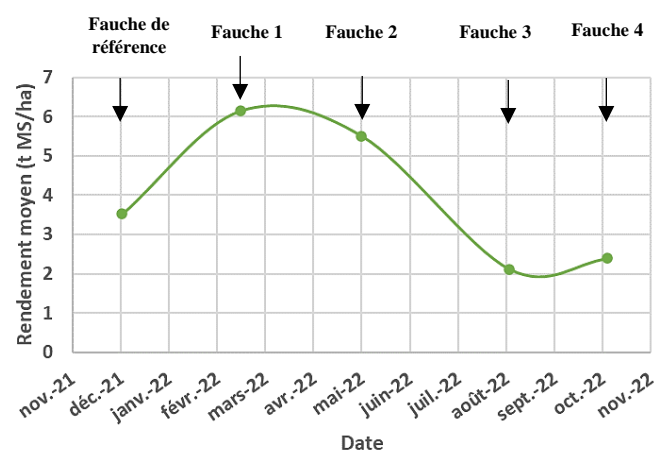


Figure 21 : Evolution du rendement moyen de chaque fauche (t MS/ha) sur la durée de l'essai (parcelle A)

Le rendement moyen par fauche (sur 4 fauches) de chaque modalité de fertilisation a été comparé au rendement moyen de la fauche de référence et au rendement moyen de la modalité témoin (T0) (Tableau 20). Ainsi, par rapport au rendement de la fauche de référence, une perte de rendement est observée pour les modalités T0 (32%) et C10 (19%), alors qu'un gain de rendement est mis en évidence pour la modalité minérale EM (de l'ordre de 65%), et les modalités mixtes, C5E, C10E et C15E (de l'ordre de 20 à 30%). En comparaison avec la modalité T0, les modalités fertilisées ont un rendement moyen par fauche supérieur. Le gain en rendement par rapport au rendement moyen T0 est supérieur à 100% pour la majorité des modalités, avec un gain maximum pour la modalité C15E, correspondant à une fertilisation mixte à base de 15 t/ha de co-compost (Tableau 20). Le gain en rendement par rapport au témoin de la modalité C10, composée de 10 t/ha de co-compost, est le plus faible, soit un gain de 36,54 %.

Tableau 20 : Gain de rendement des modalités (en %) par rapport au rendement moyen de la fauche de référence et au rendement moyen de la modalité T0 (parcelle A)

Fertilisation	T0	EM	C5E	C10E	C15E	C10
Rendement moyen de la fauche de référence (t de MS/ha)	3,06	2,92	3,31	4,11	4,21	3,51
Rendement moyen / fauche (t de MS/ha)	2,08	4,80	4,27	4,97	5,31	2,84
Gain par rapport au rendement moyen référent (%)	-32,13	64,53	28,99	20,96	26,37	-19,14
Gain par rapport au rendement moyen du T0 (%)	-	130,77	105,29	138,94	155,29	36,54

L'analyse montre que ces différences sont statistiquement significatives (Figure 22). Ainsi, la modalité minérale et les modalités mixtes se distinguent du témoin T0 par un rendement moyen supérieur. La fertilisation minérale et la fertilisation mixte à base de co-compost et d'engrais minéral a donc montré son efficacité sur le rendement de la prairie. Ces résultats obtenus sur une période de quatre cycles de fauches concordent avec ce que l'on peut trouver dans la littérature. Par ailleurs, une étude du Cirad réalisée sur 10 ans sur des prairies tropicales et tropicales d'altitude de la Réunion, a mis en évidence une augmentation des rendements des prairies sur le long terme avec des fertilisations organiques (à base de lisier de porc et de compost) et mixtes. La fertilisation mixte permettant l'obtention de bons rendements à court et long terme ; alors que, la fertilisation minérale (exclusivement azotée) a montré de meilleurs rendements à court terme mais une perte d'efficacité sur le long terme (Edouard-Rambaut 2022). Dans notre essai, la fertilisation à base de co-compost seul a montré des rendements moindres par rapport aux autres modalités (hors témoin) (Figure 22). L'effet faible de cette fertilisation sur le rendement peut être dû à un raisonnement de la fertilisation en matière brute et non en quantité efficace apportée à la plante.

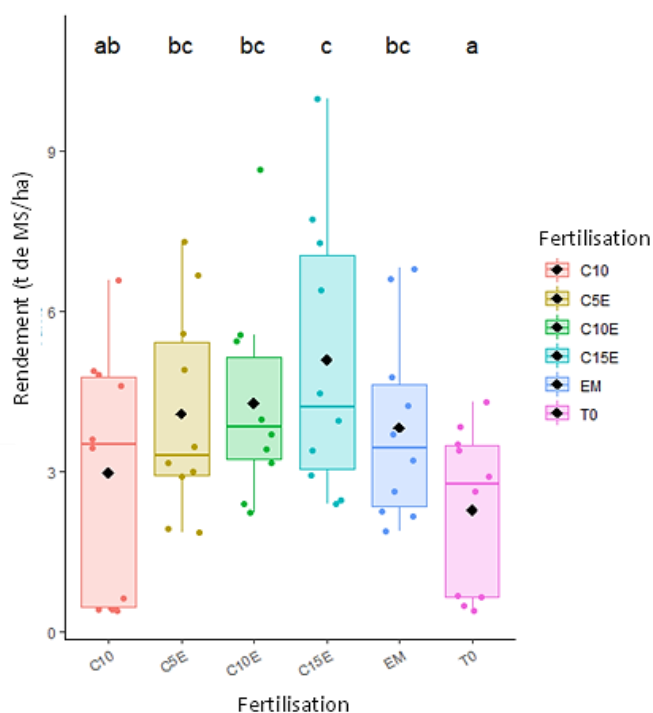


Figure 22 : Effet de la fertilisation sur le rendement de la prairie (parcelle A). Chaque point représente une fauche. Le test statistique global étant significatif un test de comparaison multiple a été effectué, les modalités dont les lettres sont différentes ont un rendement significativement différent. C10 = compost seul à 10t/ha ; C5E = engrais minéral et compost à 5 t/ha ; C10E = engrais minéral et compost à 10 t/ha ; C15E = engrais minéral et compost à 15 t/ha ; T0 = témoin non traité.

En effet, pour obtenir un rendement minimal de 12 t MS/ha/an, les besoins de la prairie sont de 360, 216 et 264 kg/ha, respectivement pour l’azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Le Tableau 21 présente les apports d’éléments fertilisants des différentes modalités en fonction des besoins. Il met en évidence pour la modalité C10, un apport de N et P, 3 et 2 fois inférieur aux besoins, expliquant la faible réponse de la prairie à la fertilisation au co-compost seul. Alors que les apports mixtes, de 10 et 15 t/ha de co-compost, ont permis de couvrir les besoins en azote et potassium de la prairie (Tableau 21), et de couvrir entre 58 et 88 % des besoins en phosphore. Pour les modalités EM et C5E, les apports en azote sont suffisants, alors qu’ils ne le sont pas pour le phosphore et pour le potassium.

Tableau 21 : Apports d’azote, de phosphore et de potassium efficaces sur la parcelle A en fonction des modalités

Modalité	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
EM	330	120	200
C5E	363	64	139
C10E	398	127	278
C15E	430	191	417
C10	102	127	278
Besoin de la prairie pour un rendement souhaité de 12 t MS/ha/an (simulation FertiRun)	360	216	264

La fertilisation appliquée pendant les 10 mois d’expérimentation a permis une production de fourrages moyenne (après fertilisation) de 8,31 ; 19,18 ; 17,07 ; 19,88 ; 21,26 et 11,35 t de MS/ha respectivement pour les modalités T0, EM, C5E, C10E, C15E et C10. La production fourragère issue d’une fertilisation minérale ou mixte est donc supérieure au rendement attendu de 12 t MS/ha/an, ainsi qu’à la production moyenne de l’éleveur, estimée à 16,8 t de MS/ha/an en 2020 (sur 5 à 6 fauches/an). Seule les modalités T0 et C10 n’ont pas permis d’atteindre ces deux rendements.

2. Effet d'une fertilisation organique à base de co-compost sur une prairie de fauche (Parcelle B)

Sur la période d'essai, allant de mars 2022 à février 2023, un total de 240 kg d'herbe a été récolté sur la parcelle expérimentale, soit 2,2 fois moins que pour l'essai sur la parcelle A. Une évolution du rendement moyen de chaque fauche (modalités et bloc confondus) a été observée (Figure 23) : de mars à mai le rendement moyen a diminué, puis a légèrement augmenté jusqu'à août, s'est stabilisé jusqu'en octobre et a augmenté par la suite. La fauche de référence et la fauche 4 ont été effectuées en saison des pluies (entre décembre et mars), où les conditions climatiques sont favorables à la pousse de l'herbe, ce qui explique le rendement moyen élevé. Alors que les fauches 1,2 et 3 ont été réalisées en saison sèche (de mai à octobre), où les températures et la pluviométrie sont faibles, d'où une croissance de l'herbe moindre et donc un rendement moyen plus faible. La fauche de référence a été effectuée plus tardivement que celle de la parcelle A (Figure 21), mais le rendement moyen des fauches est équivalent, soit 3,35 et 3,37 t MS/ha, respectivement, pour les fauches de référence de la parcelle A et B.

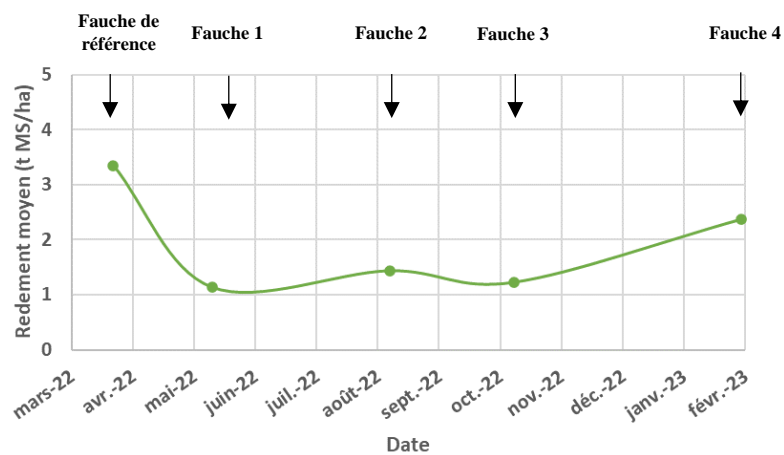


Figure 23 : Evolution du rendement moyen de chaque fauche au cours de la période d'essai (parcelle B)

Le rendement moyen par fauche (sur 4 fauches) de chaque modalité de fertilisation de cet essai a aussi été comparé au rendement moyen de la fauche de référence et au rendement moyen de la modalité témoin (T0) (Tableau 22). Ainsi, par rapport au rendement de la fauche de référence, une perte de rendement est observée pour les quatre modalités, de l'ordre de, 72, 63, 52, et 30%, respectivement, pour les modalités, T0, C5, C10 et C15. Cette perte de rendement par rapport à la fauche de référence peut s'expliquer par des périodes de fauche différentes pour la fauche de référence – plus favorable - et les autres fauches (Figure 23). En comparaison avec la modalité T0, les modalités fertilisées ont eu un rendement moyen par fauche supérieur. Le gain en rendement par rapport au rendement moyen T0 est respectivement, de 66%, 96% et 191%, pour les modalités C5, C10 et C15 (Tableau 22). La modalité C15, correspondant à une fertilisation de 15 t/ha de co-compost, offre donc le gain en rendement le plus important.

Tableau 22 : Gain de rendement des modalités (en %) par rapport au rendement moyen de la fauche de référence et au rendement moyen de la modalité T0 (parcelle B)

Fertilisation	T0	C5	C10	C15
Rendement moyen de la fauche de référence (t de MS/ha)	2,98	3,64	3,37	3,42
Rendement moyen / fauche (t de MS/ha)	0,82	1,36	1,61	2,39
Gain par rapport au rendement moyen référent (%)	-72,36	-62,72	-52,19	-30,12
Gain par rapport au rendement moyen du T0 (%)	-	65,85	96,34	191,46

L'analyse montre que ces différences sont statistiquement significatives (Figure 24). Ainsi, les modalités C10 et C15 se distinguent du témoin non traité par un rendement moyen supérieur. Alors que la modalité C5 se distingue peu du témoin, malgré un rendement moyen supérieur. La modalité C15 semble donc la plus intéressante à utiliser.

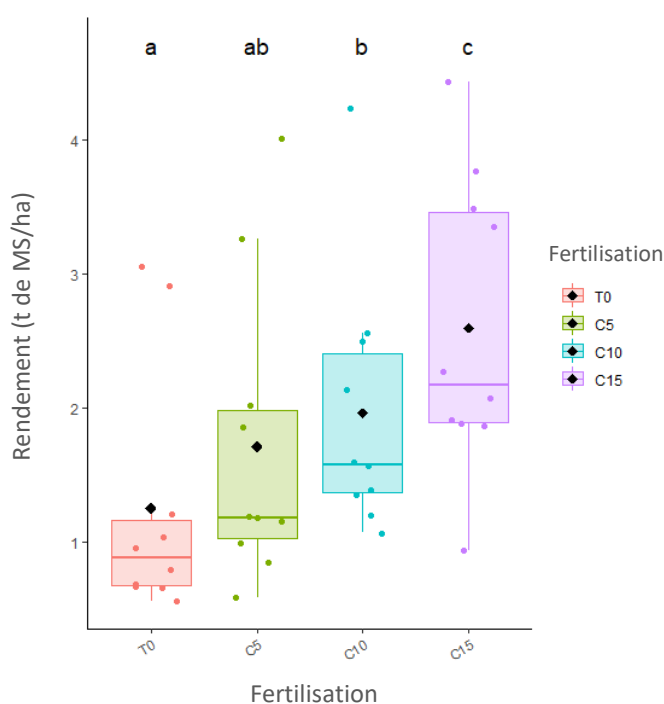


Figure 24 : Effet de la fertilisation sur le rendement de la prairie (parcelle B). Chaque point représente une fauche. Le test statistique global étant significatif un test de comparaison multiple a été effectué, les modalités dont les lettres sont différentes ont un rendement significativement différent. T0 = témoin non fertilisé ; C5 = co-compost à 5t/ha ; C10 = co-compost à 10 t/ha ; C15 = co-compost à 15 t/ha.

La fertilisation appliquée pendant les 10 mois d'expérimentation a permis une production de fourrages moyenne (après fertilisation) de 3,30 ; 5,42 ; 6,44 et 9,56 t de MS/ha respectivement pour les modalités T0, C5, C10, C15. La production fourragère issue de la fertilisation exclusivement organique n'a donc pas permis de surpasser la production moyenne de l'éleveur, estimée à 11 t de MS/ha/an en 2020 (sur 3 à 4 fauches/an), bien que la modalité C15 permette de s'en rapprocher. Par comparaison, la production fourragère de la parcelle B est bien moindre que celle de la parcelle A.

Le Tableau 23 présente les apports d'éléments fertilisants des différentes modalités en fonction des besoins correspondant à un rendement de 12 t MS/ha/an. Il met en évidence pour l'ensemble des modalités, un apport d'azote 4 fois (pour la modalité C5) à 1,5 fois (pour la modalité C15) inférieur aux besoins, alors que les besoins en phosphore et potassium sont partiellement à totalement couverts pour les trois modalités. En effet, seulement 44 et 88% des besoins du phosphore sont couverts respectivement par les modalités C5 et C10 ; la modalité C15 apportant plus de phosphore que nécessaire. Pour ce qui concerne le potassium, seules les modalités C10 et C15 permettent de couvrir les besoins. Ainsi, la modalité C15 est celle qui a permis de couvrir au mieux les besoins en éléments fertilisants de la prairie, d'où un gain en rendement moyen par fauche et une production fourragère totale supérieure aux trois autres modalités. Les faibles apports en éléments fertilisants peuvent expliquer que le rendement moyen des modalités soit plus faible que le rendement espéré et le rendement déclaré par l'éleveur.

Tableau 23 : Apports d'azote, de phosphore et de potassium efficaces sur la parcelle B en fonction des modalités

Modalité	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
C5	77	96	209
C10	152	191	417
C15	229	287	625
Besoin de la prairie pour un rendement souhaité de 12 t MS/ha/an (simulation FertiRun)	360	216	264

CONCLUSION

Les co-composts produits lors des essais process technologique ont été testés, dans cette étude, en tant que fertilisant organique. Ces essais ont mis en évidence un effet positif de l'apport de matière organique (associé ou non à de l'engrais minéral) sur le rendement de la prairie. En effet, sur la parcelle A, les rendements obtenus avec la fertilisation organique et minérale ont permis d'atteindre et de dépasser le rendement espéré et le rendement habituel de l'éleveur. Selon la quantité de co-compost appliquée, les rendements obtenus avec la fertilisation mixte ont été équivalents voire supérieurs (notamment avec la modalité C15E) au rendement obtenu avec la fertilisation minérale. Cependant, sur cette parcelle la fertilisation exclusivement à base de co-compost n'a pas permis d'atteindre le rendement espéré ni le rendement habituel de l'éleveur du fait d'un apport insuffisant en éléments fertilisants, notamment d'azote. Sur la parcelle B, la fertilisation à base de co-compost a permis un gain de rendement par rapport à la modalité témoin sans fertilisation, mais les quantités apportées, ne couvrant pas les besoins en azote de la prairie, n'ont pas permis d'atteindre le rendement espéré ni le rendement habituel de l'éleveur.

L'utilisation du co-compost comme fertilisant sur prairies de fauche nécessite donc d'adapter les quantités de matières à apporter aux besoins des cultures, et compléter si nécessaire cette fertilisation organique avec un engrais minéral ou organique. L'effet amendant n'a pas été testé ici, mais du fait de la nature du compost et de la teneur en matière organique, l'apport de co-compost sur la prairie aura un impact positif sur la fertilité du sol et donc à long terme sur le rendement de la prairie, comme il a été observé sur l'étude long terme (Edouard-Rambaut, 2022).

CONCLUSION GENERALE

Les expérimentations menées dans le cadre du volet 3 du projet CONVER ont confirmé l'intérêt du co-compostage des effluents d'élevage avec du broyat de déchets verts. En effet, ce procédé réalisé à la ferme avec le matériel présent sur l'exploitation (tracteur, tonne à lisier...), permet de réduire les excédents d'azote du fait des pertes par volatilisation (de l'ordre de 40% dans cette étude), de réduire les volumes d'effluents à épandre (de l'ordre de 12 à 30%) ainsi que les odeurs libérées à l'épandage. Le co-compostage, tel que réalisé dans cette étude, aboutit à l'obtention d'un produit normé amendement organique, pouvant de fait sortir du plan d'épandage des éleveurs. La réalisation de ce compostage, notamment le choix des ratios volumiques et la durée de process, sont à adapter en fonction des conditions de réalisation du compostage et des objectifs des éleveurs (normer ou non son compost, obtenir un produit avec un effet fertilisant ou amendement important...). Le co-compostage du lisier de porc et de broyat de déchets verts pose cependant une limite par rapport au co-compostage de fumier de volaille et de broyat de déchets verts. En effet, le co-compostage d'effluents liquides comme le lisier nécessite d'importants apports de matières carbonées. Le ratio étudié dans cette étude sur un substrat de broyat de déchets verts n'a pas pu être maximisé. Or, selon les quantités de lisier à traiter, la part de broyat de déchets verts à incorporer peut être très importante. Cette ressource étant payante pour les éleveurs, le coût d'acheminement du broyat sur les exploitations peut être important, rendant le traitement du lisier par co-compostage coûteux selon les cas. Dans ce contexte le co-compostage du lisier de porc avec du broyat de déchets ne peut pas être une solution unique, mais doit être adapté à chaque situation. Ainsi, d'autres actions conduites par différents organismes dont les coopératives porcines et de volaille, la Chambre d'Agriculture, la FRCA et la DAAF, accompagnent les éleveurs dans la mise en place de solutions de traitement de leurs effluents et l'application de la réglementation. La création du Comité de Gestion des Effluents, en 2022, marque la volonté de l'ensemble des acteurs agricole du territoire d'agir en synergie pour trouver des solutions à cette problématique.

Les produits obtenus, lors du procédé de co-compostage par retournement, correspondent à des amendements organiques. L'impact à long terme de ces derniers sur la fertilité des sols n'a pas été étudié ici, mais les caractéristiques physico-chimiques ont mis en évidence un potentiel humigène important. Par ailleurs, l'effet fertilisant de ces produits a été testé sur des systèmes de cultures maraîchers et prairiaux montrant leur intérêt pour l'obtention d'un rendement satisfaisant. Les co-composts peuvent alors être utilisés seuls ou en association avec un engrais minéral. Ce choix est à adapter en fonction des teneurs en éléments majeurs des co-composts, de la fertilité des sols et des exigences culturales. Ainsi, dans un contexte de forte dépendance aux engrais importés, dont le prix augmente, les co-composts d'effluents d'élevage et de broyat de déchets verts apparaissent comme une alternative aux engrais minéraux. Cependant, la perte d'azote liée au procédé de compostage, met en évidence un enjeu majeur autre que l'augmentation de la circularité des nutriments qui est l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation de ces nutriments. En effet, l'efficacité de l'utilisation de l'azote à la Réunion, en prenant en compte l'agriculture, l'alimentation et les déchets, a été estimée à 0,7% (Kleinpeter et al, 2023). L'inefficacité de l'utilisation de l'azote est due à 51% aux différents processus impliqués dans les activités de production végétale et animale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME, 2012. Programme de recherche de l'ADEME sur les émissions atmosphériques du compostage. Connaissances acquises et synthèse bibliographique [en ligne]. ADEME. [Consulté le 7 mai 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/20120701_programme-de-recherche-de-l-ademe-sur-les-emissions-atmospheriques-du-compostage_ademe.pdf
- ALISON, C., CHOISIS, J.P., CONROZIER, R., DEULVOT, A., GUILLOUAI, S., THOMAS, P. et THURIES, L., 2020. Petit guide du compostage à la ferme. Guide. La Réunion.
- ALISON, C., DEULVOT, A., CHOISIS, J.P. et THOMAS, P., 2021. Mise en place d'une unité de compostage: élevage mixte porcs-volailles (île de La Réunion 2021). La Réunion.
- BLANFORT, V., 1998. Agroécologie des pâturages d'altitude à l'île de la Réunion: pratiques d'éleveurs et durabilité des ressources herbagères dans un milieu à fortes contraintes [en ligne]. Thèse. La Réunion : Université de Paris XI Orsay. [Consulté le 13 décembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/315497/1/ID315497.pdf>
- CHABALIER, P.F., VAN DE KERCHOVE, V. et SAINT MACARY, H., 2006. Guide de la fertilisation organique à La Réunion [en ligne]. La Réunion. [Consulté le 7 mai 2021]. ISBN 2 87614 629 0. Disponible à l'adresse : <https://www.mvad-reunion.org/wp-content/uploads/2019/10/Guide.pdf>
- CIRAD, 1997. Synthèse des essais menés sur les composts de l'entreprise HOW-CHOONG. 1997.
- DARRAS, A., 2019. Exploration de scénarios de valorisation en agriculture des déchets verts urbains dans le sud de l'île de La Réunion. Mémoire de fin d'études. La Réunion : AgroParisTech.
- DÉPARTEMENT DE LA RÉUNION, 2019. AGRIPéi 2030: 39 actions pour un modèle agricole réunionnais responsable [en ligne]. La Réunion : Département de La Réunion. [Consulté le 14 septembre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.departement974.fr/sites/default/files/2019-11/agripei2030-39actions.pdf>
- EDOUARD-RAMBAUT, L.A., 2022. Impact agronomique et environnemental d'une fertilisation long terme - mixte minérale et organique - sous prairies tropicales et tropicales d'altitude [en ligne]. Montpellier : Montpellier Supagro. [Consulté le 6 février 2023]. Disponible à l'adresse : <https://www.theses.fr/s228468>
- ELKADER, N., ROBIN, P., PAILLAT, J.M. et LETERME, P., 2007. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting. *Bioresource Technology*. octobre 2007. Vol. 98, n° 14, pp. 2619-2628. DOI 10.1016/j.biortech.2006.07.035.
- ESPAGNOL, S., HASSOUNA, M., ROBIN, P., LEVASSEUR, P. et PAILLAT, J.M., 2006. Emissions gazeuses de NH₃, N₂O, CH₄ lors du stockage de fumier de porc provenant d'une litière accumulée: effets du retournement. *Journées Recherche Porcine*. janvier 2006. Vol. 38, pp. 41-48.
- FRABOULET, P., JOURDE, A. et PAILLAT, J.M., 1998. Etude du compostage du lisier de porc et de lapin sur différents types de supports carbonés en conditions tropicales. La Réunion : CIRAD et Coopérative des Producteurs de Porcs de la Réunion.
- FRANCOU, C., 2003. Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains: Influence de la nature des déchets et du procédé [en ligne]. INA P-G : Institut national agronomique paris-grignon. [Consulté le 29 novembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00007519/file/tel-00007519.pdf>
- GAFFIER, C., 2017. Analyse de la gestion des déchets verts urbains par un syndicat de traitement des déchets: stratégies actuelles et potentielles de valorisation dans le contexte réunionnais. Mémoire de fin d'études. La Réunion : AgroParisTech.
- GOBAT, J.M., ARAGNO, M. et MATTHEY, W., 2003. Le sol vivant: Bases de pédologie - Biologie des sols. Nouvelle édition revue et augmentée. Paris. ISBN 978-2-88074-718-3.
- JAROUSSEAU, H., DAVID, D., DOELSCH, E., FARINET, J.L., FEDER, F., GUERRIN, F., MÉDOC, J.M., QUESTE, J., PAILLAT, J.M., SAINT MACARY, H., SALLOTE, B., THURIÈS, L. et WASSENAAR, T., 2016. La Réunion: recyclage de PRO en milieu insulaire tropical. In : Le recyclage des résidus organiques: regards sur une pratique agro-écologique [en ligne]. Versailles : Editions Quae. pp. 193-213. Matière à débattre et à décider. [Consulté le 7 mai 2021]. ISBN 978-2-7592-2562-0. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/583044/1/Chapitre%2010.pdf>

JARRY, R., 2019. Modélisation des flux d'effluents d'élevage sur le territoire de Saint-Joseph, en lien avec la dynamique du bâti. Mémoire de fin d'études. La Réunion : AgroParisTech.

LELEUX, M., 2016. Etude des perspectives sur la ressource fourragère [en ligne]. Rapport d'expertise No. 3. La Réunion : BRL ingénierie. [Consulté le 13 décembre 2022]. Disponible à l'adresse : https://agritrop.cirad.fr/600933/1/MirallesBruneau_al_2022_AdaptationDeLaMethodeDuBilanAzoteAuContexteDesPrairiesReunionnaises.pdf

LINIÈRES, M. et DJAKOVITCH, J.L., 1993. Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. In : Matières organiques et agricultures. Blois : Gemas-Comifer. 1993. pp. 159-168. hal-02776986

MANDRET, G., BLANFORT, V., PAILLAT, J.M., BARBET-MASSIN, V., FONTAINE, O. et RIVIÈRE, E., 2000. L'installation et la fertilisation des parcelles fourragères. In : L'élevage bovin à la Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche [en ligne]. Repères. Montpellier : CIRAD. pp. 97-127. [Consulté le 13 décembre 2022]. ISBN 2-87614-374-7. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/264269/1/ID264269.pdf>

MANDRET, G., PAILLAT, J.M., BIGOT, A., FONTAINE, O., LATCHIMY, J.Y. et RIVIÈRE, E., 2000. Le comportement des espèces fourragères. In : L'élevage bovin à la Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche [en ligne]. Repères. Montpellier : CIRAD. pp. 65-96. [Consulté le 13 décembre 2022]. ISBN 2-87614-374-7. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/264831/1/ID264831.pdf>

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, 2018. Feuille de route Economie circulaire : 50 mesures pour une économie 100% circulaire [en ligne]. 2018. [Consulté le 10 février 2022]. Disponible à l'adresse : https://agronomie.asso.fr/fileadmin/user_upload/revue_aes/aes_vol11_n2_dec2021/pdf/aes_vol11_n2_15_vigne-et-al.pdf

MIRALLES-BRUNEAU, M., PELLIER, Y., PIERRE, P., AVERNA, J., TILLARD, E. et DELABY, L., 2022. Le premier observatoire de la croissance de l'herbe en Outre-Mer : présentation du dispositif de la Réunion et des premiers résultats. Fourrages. 2022. Vol. 249, pp. 39-44.

MIRALLES-BRUNEAU, M., PIERRE, P., BOYER, A., RIVIÈRE, E., DELABY, L. et TILLARD, E., 2022. Adaptation de la méthode du bilan azoté au contexte des prairies réunionnaises. Contribution à l'analyse de la fourniture d'azote des sols prairiaux à l'île de La Réunion. Fourrages. 2022. Vol. 249, pp. 69-76.

MUSTIN, M., 1987. Le compost : gestion de la matière organique. Paris : Ed. F. Dubusc. ISBN 2-86472-008-6.

OUDART, D., 2013. Modélisation de la stabilisation de la matière organique et des émissions gazeuses au cours du compostage d'effluents d'élevage [en ligne]. Thèse de Doctorat : Ingénierie de l'environnement. Toulouse : INSA. [Consulté le 7 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00935691v2/documentHAL> : tel-00935691v2

PAILLAT, J.M., 1998. Gestion des effluents d'élevage à la Réunion : transformer la nuisance en fertilité. Programme de recherche CORDET 94 DA 51 (Rapport final) [en ligne]. Programme de recherche CORDET 94 DA 51 (Rapport final). La Réunion : CIRAD-SAR. [Consulté le 7 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/314880/AGRITROP>: 314880

PAILLAT, J.M., ROBIN, P., HASSOUNA, M. et LETERME, P., 2005. Predicting ammonia and carbon dioxide emissions from carbon and nitrogen biodegradability during animal waste composting. Atmospheric Environment. 1 novembre 2005. Vol. 39, n° 36, pp. 6833-6842. DOI 10.1016/j.atmosenv.2005.07.045.

PAILLAT, J.M. et GALLO, J.Y., 1996. Analyse des flux de matières organiques dans la localité de « Dos d'âne » [en ligne]. La Réunion : CIRAD-SAR. [Consulté le 7 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/327032/1/ID327032.pdf>

PAILLAT, J.M., ROBIN, P., HASSOUNA, M. et LETERME, P., 2005. Effet du compostage d'effluents porcins sur les émissions gazeuses et les teneurs en éléments polluants. Rapport final - Action 42c, Porcherie Verte. Cirad, Inra-EA, Agrocampus.

PAYET, N., VAN DE KERCHOVE, V., DOELSCH, E. et MOUSSARD, G., 2008. Composts de déchets verts urbains réunionnais : origine des concentrations élevées en Eléments Traces Métalliques (ETM) [en ligne]. La Réunion : Chambre d'agriculture Réunion et Cirad. [Consulté le 10 mai 2021]. Disponible à l'adresse : https://agritrop.cirad.fr/545566/1/document_545566.pdf

POULET, S., 2021. Contribution de l'élevage et des émissions de gaz à effet de serre indirectes au bilan carbone du secteur agricole de l'île de La Réunion en 2018. Mémoire de fin d'études. La Réunion : l'institut Agro - Montpellier SupAgro.

QUESTE, J., 2016. Concertation et changements : le cas du recyclage des déchets organiques à la Réunion [en ligne]. Thèse de Doctorat : Sociologie. Grenoble : Université Grenoble Alpes. [Consulté le 7 mai 2021]. Disponible à l'adresse : https://agritrop.cirad.fr/587578/1/QUESTE_2016_archivage.pdf

RAFOLISY, T., THURIÈS, L., TÉCHER, P., MOUSSARD, G. et PAILLAT, J.M., 2015. Co-compostage de boues de laiterie et de fumier de bovins à l'île de la Réunion : hygiénisation, pertes de nutriments et homogénéité du compost produit. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*. 2015. Vol. 19, n° 4, pp. 329-337.

RMT ELEVAGE ET ENVIRONNEMENT, 2019. Fiche PVB10 : Compostage des effluents. In : Guide des bonnes pratiques environnementales d'élevage [en ligne]. pp. 1-13. [Consulté le 17 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.rmtelevagesenvironnement.org/docs/fiches/gbpee/commun/pvb-fiche-10.pdf>

ROBIN, D., 1997. Intérêt de la caractérisation biochimique pour l'évaluation de la proportion de matière organique stable après décomposition dans le sol et la classification des produits organominéraux. *Agronomie*. 1997. Vol. 17, n° 3, pp. 157-171. hal-00885834

ROBIN, P., PAILLAT, J.M., LORINQUER, E., AUBERT, C., TOUDIC, A., FARINET, J.L., CLUZEAU, D., PONCHANT, P., LEVASSEUR, P., LE BRIS, B., CAPDEVILLE, J., OUDART, D., AKKAL-CORFINI, N. et HASSOUNA, M., 2018. Procédés et traitements par compostage des effluents d'élevages. In : *Compostage et composts : Avancées scientifiques et techniques* [en ligne]. Lavoisier Tec et Doc. pp. 569-576. [Consulté le 7 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/589434/13/ID589434.pdf>

SICA LAIT et UAFF, 2001. Mieux gérer les effluents des élevages bovins dans une perspective d'amélioration de la productivité des prairies et de réduction des pollutions. La Réunion : SICA lait et Union des Associations Foncières Pastorales.

THOMAS, P., BARBET-MASSIN, V., GRIMAU, P. et MICHON, A., 2004. Guide technique pour la création et la valorisation des prairies à la Réunion [en ligne]. Plaine des Cafres : UAFF, CIRAD. [Consulté le 13 décembre 2022]. Disponible à l'adresse : https://agritrop.cirad.fr/600933/1/MirallesBruneau_al_2022_AdaptationDeLaMethodeDuBilanAzoteAuContexteDesPrairiesReunio nnaises.pdf

THURIÈS, L., DOMINIQUE, M., NDÈYE, Y., BADIANE, N. et FEDER, F., 2016. La caractérisation des PRO pour éclairer les choix d'usage en agriculture : le point de vue du biochimiste-agronome. In : *Le recyclage des résidus organiques : regards sur une pratique agro-écologique* [en ligne]. Versailles : Editions Quae. pp. 91-108. Matière à débattre et à décider. [Consulté le 7 mai 2021]. ISBN 978-2-7592-2562-0. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/583040/1/Chapitre%205.pdf>

VAN DE KERCHOVE, V., LEUNG, J. et QUINQUENEL, S., 2018. Ferti-run : Manuel de l'utilisateur [en ligne]. novembre 2018. [Consulté le 8 décembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.mvad-reunion.org/wp-content/uploads/2021/03/Ferti-run-2018-MANUEL-DE-LUTILISATEUR.pdf>

VIGNE, M., ACHARD, P., ALISON, C., CASTANIER, C., CHOISIS, J.P., CONROZIER, R., COURDIER, R., DEGENNE, P., DEULVOT, A., DUPUY, S., FÉVRIER, A., HATIK, H., HUAT, J., KLEINPETER, V., KYULAVSKIM, V., LURETTE, A., PAYET, A.L., RONDEAU, P., SOULIÉ, J.C., THOMAS, P., THURIES, L., TILLARD, E., VAN DE KERCHOVE, V. et VAYSSIÈRES, J., 2021. Une agronomie clinique et territoriale pour accompagner la transition vers une économie circulaire autour de l'agriculture : mise à l'épreuve et enseignements du projet GABiR à La Réunion. *Agronomie, environnement & sociétés* [en ligne]. 15 décembre 2021. Vol. 11, n° 2. [Consulté le 10 février 2022]. DOI 10.54800/bir974. Disponible à l'adresse : <https://agronomie.asso.fr/aes-11-2-15>

WASSENAAR, T., QUESTE, J., PAILLAT, J.M. et SAINT MACARY, H., 2015. La co-construction de filières de recyclage de résidus organiques à la Réunion. *Innovations Agronomiques*. 2015. Vol. 43, pp. 161-175.

WASSENAAR, T., QUESTE, J. et PAILLAT, J.M., 2016. Le recyclage agricole des résidus organiques : une ressource naturelle pour en préserver d'autres. *Agronomie Environnement et Sociétés*. juin 2016. Vol. 6, n° 1, pp. 99-108.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Table de données et plan factoriel de l'ACP

Tableau 1 : Caractéristiques agronomiques des composts de références, notés « ref » (source : Guide de la fertilisation organique, MVAD), des composts analysés dans le cadre du projet. Les teneurs affichées (g/kg MB) sont des moyennes pour les composts de références. FB = Fumier de bovin ; FV = Fumier de volaille ; FP = Fumier poule pondeuse ; LP = Lisier de porc ; Bg = Bagasse ; BDV = Broyat de déchets verts ; BE = Boues d'épuration.

	Ntot	Nammo	Ptot	Ktot	MS	MO
FB_ref	7,6	NA		3	7,3	192
FV_ref	24,7	7,4	17,3	19	683	559
FP_ref	13,2	4	25	14,7	417	339
FV_LP_ref	7,7	NA	13,2	7,9	297	227
LP_Bg_ref	4,3	NA	5	2,6	257	153
Geranium_ref	9,2	NA	1,8	8,6	280	204
BDV_ref	9,1	NA	4,3	5,8	547	278
BDV_BE_ref	14,4	NA	9,5	7,9	645	309
FV_BDV_A1_T40	21,3	5,3	9,7	17,4	477	346
FV_BDV_A1_T90	14,4	1,69	9,84	13,9	441	257
FV_BDV_A2_T90	11,8	0,8	9,5	10	482	201
FV_BDV_B1_T40	17	3,45	4,16	15,4	614	512
FV_BDV_B1_T90	19	1,35	9,56	18	581	344
FV_BDV_B2_T180	17	0,4	12,6	14,6	538	323
BDV_LP_C1	7,9	0,01	4,8	8,01	433	216
BDV_LP_exp	8,2	0,697	2,87	10,34	567,7	257
BDV_LP_FV_exp	15,3	6,1	5,5	9,3	443	242
Geranium_exp	9,8	0,596	1,08	1,11	299,6	210

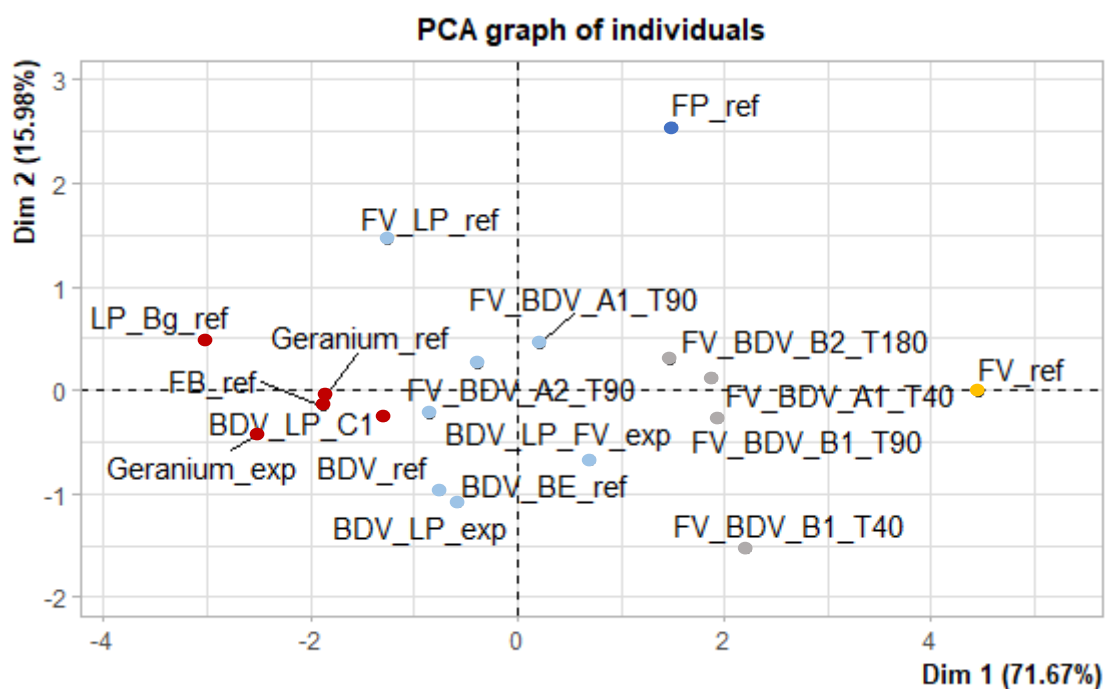


Figure 1 : plan factoriel des individus issu de l'ACP

ANNEXE 2 : Conditions climatiques (température et humidité) des parcelles maraîchères A, B, C, D

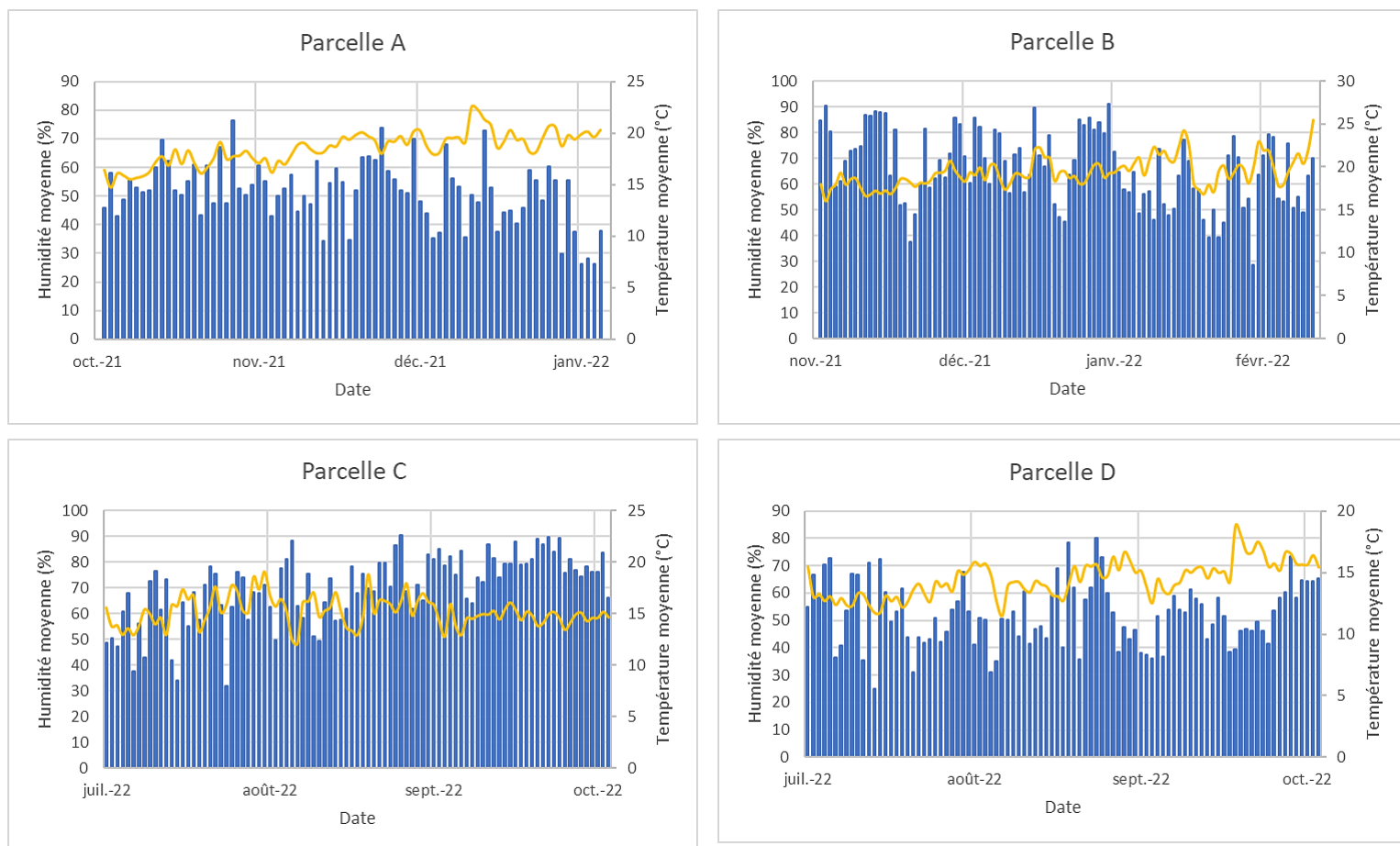


Figure 1 : Evolution de la température moyenne (courbe jaune) et de l'humidité moyenne (courbe bleue) sur les parcelles expérimentales A, B, C, D, durant la période d'essai.