

Intensifier la production animale au pâturage : le vermicompost, pratique agro-écologique

Boval M.¹, Faverial J.², Mulciba P.³, Loranger-Merciris G.L.M.⁴, Sierra J.²

¹INRA, URZ 143, Domaine Duclos, Prise d'Eau, 97170 Petit Bourg, Guadeloupe, France.

²INRA, UR ASTRO 1321, Domaine Duclos, Prise d'Eau, 97170 Petit Bourg, Guadeloupe, France.

³INRA, PTEA 1294, Domaine Gardel, 97160 Le Moule, Guadeloupe, France

⁴Université des Antilles et de la Guyane Campus de Fouillole, BP 250, F- 97157 Pointe-à-Pitre cedex

Correspondance: maryline.boval@antilles.inra.fr

Résumé

L'intensification des pâturages est essentielle face à la demande croissante en produits animaux, mais aussi pour d'autres fonctions, l'entretien des espaces, la subsistance et le bien-être des populations. Cette intensification doit en outre tenir compte de la réduction de l'espace agricole, favoriser les interactions positives avec l'environnement et la biodiversité, tout en garantissant l'approvisionnement des populations. Les principes agro-écologiques répondent précisément à ce besoin d'une « autre intensification ». L'utilisation de vermicompost impliquant l'action des vers de terre est un exemple de pratique agro-écologique, pouvant participer à l'intensification des prairies et qui a été étudiée dans le cadre d'un appel à projet AGRIBIO3. Outre que cette pratique permet le recyclage et la valorisation de divers effluents d'élevage, elle améliore la qualité organique du sol, la biodisponibilité en nutriments, et la biomasse prairiale, tout en ayant une action nématophage bénéfique à un moindre parasitisme gastro-intestinal de petits ruminants conduits au pâturage. Les atouts biologiques et financiers à de cette pratique à plus long terme et leur généralisation à divers systèmes prairiaux, doivent être quantifiés.

Mots-clés : Agro-écologie, vers de terre, fertilisation, performances, parasitisme, nématophage.

Abstract: Intensify pastures for livestock production: vermicompost use, an agro-ecological practice

The intensification of animal production at pasture is essential to meet the growing demand for animal products but also for other functions, the maintenance of areas, livelihoods and well-being of populations. This intensification must also take into account the reduction of agricultural land, promote positive interactions with the environment and biodiversity, while ensuring the supply of populations. The use of vermicompost involving the action of earthworms is an example of agro-ecological practices, to participate in the intensification of grassland and which has been studied in the context of a call to project, AGRIBIO3. Besides the fact that this practice makes it possible to achieve a proper recycling and recovery of various manures, it improves the quality of organic soil, nutrient bioavailability, and grassland biomass while having a nematophagous action, beneficial to a lesser gastrointestinal parasitism of grazing small ruminants. The biological and financial advantages of this practice in the longer term, and their use to various grassland systems must be quantified.

Keywords: Agro-ecology, earthworms, fertilizer, performance, parasitism, nematophagous

Introduction

Les pâturages constituent une alternative majeure dans le contexte actuel pour intensifier la production animale, face au défi plus urgent que jamais, de nourrir environ 9 milliards de bouches d'ici 2050 (ONU, 2008). Même les scénarios les plus optimistes postulent une augmentation nécessaire de la production alimentaire, d'au moins 50 % d'ici 2050 (Lal *et al.*, 2013 ; Gill *et al.*, 2010).

L'intensification initiée dans les années 60 avec la première «révolution verte» a permis une croissance impressionnante de la consommation alimentaire, de 25 % en moyenne par habitant (FAO, 2009). Mais les modalités de cette intensification ont provoqué des effets secondaires défavorables (Delgado, 2003 ; Fedoroff *et al.*, 2010), une utilisation intensive d'engrais et d'eau, une augmentation des émissions de nitrates et de pesticides, sans oublier l'épuisement des eaux souterraines (Moss, 2008; Bennett *et al.*, 2005) et la dégradation des sols, alors plus émetteurs en GES (Russelle *et al.*, 2007). Enfin ce modèle d'intensification a eu des impacts sociaux, de nombreux agriculteurs étant incapables de rivaliser dans cette «course vers le bas» (Horlings et Marsden, 2011).

L'expansion de l'espace agricole d'environ 9.6 %, incluant les terres arables, les cultures et les prairies permanents, a également permis de faire face à la demande au cours des 50 dernières années, (O'Mara, 2012). Cependant depuis 1991, la superficie totale a stagné, avec d'une part une diminution dans les pays développés (- 34 % entre 1995 et 2007) et une augmentation dans les pays en développement d'autre part (+ 17,1 %, Gibbs *et al.*, 2010). Selon la projection FAO, les zones agricoles mondiales sont susceptibles d'augmenter encore sensiblement (d'environ 280 Mha en 2030), mais il y a un consensus face à la nécessité d'augmenter les rendements à partir des terres agricoles existantes, sans expansion significative (Wirsenius *et al.*, 2010).

Il est aujourd'hui essentiel d'intensifier autrement, à partir des surfaces existantes qui concernent une bonne part des zones et prairies tropicales, ainsi que les forêts intactes défrichées pour le pâturage (Gibbs *et al.*, 2010), pour faire face à la demande en produits agricoles alimentaires, ainsi qu'en carburant. La fonction d'approvisionnement et la maximisation de la consommation d'énergie métabolisable et de nutriments par les animaux d'élevage a été l'objectif principal des nombreux travaux conduits au cours des décennies (Minson, 1990 ; Poppi, 1996 ; Lemaire *et al.*, 2009), dans les limites fixées par le génotype, l'état physiologique et les fluctuations saisonnières de la biomasse prairiale. Les stratégies alors largement étudiées et développées ont concerné l'application d'engrais, la gestion du chargement, ou l'apport de compléments alimentaires (Boval et Dixon, 2012). Et jusqu'à récemment, peu d'attention a été accordée aux multiples fonctions des prairies, la durabilité, la biodiversité ou le cycle des éléments nutritifs des écosystèmes (Ash *et al.*, 2011 ; Orr et O'Reagain, 2011). Il s'agit ici de montrer qu'il est réellement possible d'intensifier autrement les pâturages, avec des pratiques agro-écologiques, pouvant assurer plusieurs fonctions, qui bien que déjà pratiquées de longue date, sont revisitées et reconsidérées par la recherche, pour une meilleure valorisation et la création d'innovations appropriables par les éleveurs.

1. Intensifier autrement les pâturages pour répondre à la demande alimentaire

Les pâturages représentant 26 % des terres de la planète, encore naturels pour près de 80 %, ou non arables, car trop pentues, partiellement inondables ou intégrées avec des cultures, constituent une alternative majeure pour répondre à une demande sans précédent sur l'agriculture (FAO, 2012). L'exploitation des prairies entre peu en compétition en effet avec d'autres productions et d'autres activités humaines et différents produits peuvent être obtenus alors à moindre coût, avec en bonus une valeur ajoutée liée à la qualité des produits (Gracia et Zeballos, 2011) et la perception des produits «naturels», pour laquelle de nombreux consommateurs sont prêts à payer. Par ailleurs, les prairies permettent une grande flexibilité et différents types d'intensification dans des contextes différents, en fonction des besoins et des contraintes locales environnementales et économiques. Ainsi, alors que des

systèmes intégrés culture-élevage sont associés avec des régions à forte densité de population (Herrero *et al.*, 2009; Tarawali *et al.*, 2011), des systèmes pastoraux extensifs occupent des régions où la production agricole est généralement marginale.

Ces prairies présentent par ailleurs une forte multifonctionnalité, qu'il convient de valoriser dans un processus nouveau d'intensification (Boval et Dixon, 2012). Outre leur rôle essentiel dans l'alimentation des animaux d'élevage et la fourniture de produits de qualité, les prairies représentent, entre autres, une réserve incomparable de biodiversité (Ma et Swinton, 2011 ; Metera *et al.*, 2013) et un contributeur majeur à la séquestration du carbone dans les sols (Allard *et al.*, 2007 ; Ammann *et al.*, 2007 ; Soussana *et al.*, 2013). Elles sont par ailleurs à la base de moyens de subsistance essentiels pour de nombreuses populations à faible revenu, et offrent de nombreux services sociaux, culturels et récréatifs, qui sont parfois sous-estimés et qui peuvent être sources de revenus, en complément des services d'approvisionnement. En outre, les systèmes de production basés sur les prairies favorisent les circuits courts, réduisant ainsi le coût de la distribution alimentaire. Le développement des chaînes alimentaires locales semble en outre avoir un impact positif sur la consommation d'énergie et contribuent à une valorisation du travail agricole et au renforcement des liens sociaux entre ville et campagne (Mundler et Rumpus, 2012).

Les principes agro-écologiques correspondent précisément à une nécessaire intensification plus durable des pâturages, permettant d'intégrer leur multifonctionnalité, sans doute plus que pour d'autres secteurs agricoles. L'agroécologie est dans sa définition la plus large « l'étude intégrative des systèmes alimentaires », tenant compte de dimensions écologiques, économiques et sociales» (Francis *et al.*, 2003). Ainsi, l'agriculture est considérée comme devant intégrer les processus écologiques qui améliorent les services écosystémiques, le stockage du carbone, la biodiversité, le lessivage et autres. Par ailleurs, l'intensification, pour être efficace, doit également être compatible avec les contextes sociaux et les intérêts des producteurs et des petits exploitants, étant pris en compte l'analyse de leurs attitudes et de leurs pratiques (Altieri, 1989 ; Wezel *et al.*, 2009). L'agroécologie fournit réellement la base scientifique, méthodologique et technologique pour une nouvelle «révolution agraire» (Altieri *et al.*, 2012).

Il convient alors de rechercher des voies innovantes pour une autre intensification des pâturages, qui requièrent peu d'intrants classiques, favorisent les interactions positives avec l'environnement, tout en assurant l'approvisionnement nécessaire en protéines aux populations humaines. Une de ces voies alternatives concerne le processus de vermicompostage.

2. Qu'est-ce que le vermicompostage ?

Le vermicompostage ou lombricompostage est un procédé biotechnologique simple de compostage, qui est considéré en agro-écologie comme la clé de la fertilisation. Le vermicompostage permet alors, en faisant appel à l'action des vers de terre, de convertir en un processus plus rapide que le compost, une grande diversité de déchets organiques, en un produit plus riche en éléments minéraux qu'un compost classique, qui sont plus rapidement disponibles pour les plantes (Edwards et Burrows, 1988). Les turricules excrétés par les vers de terre sont par ailleurs connus pour être des promoteurs d'une activité microbienne intense, de la croissance des plantes cultivées et de la répulsion des ravageurs.

Le vermicompostage inclut donc certaines phases du compostage classique, complétées de la dégradation enzymatique des matières organiques qui passent à travers le tube digestif des vers de terre.

2.1 Le pré-compostage

Préalablement au vermicompostage, le pré-compostage favorise la dégradation microbienne, le ramollissement des matières organiques et leur assimilation par les vers de terre.

La phase de décomposition (ou phase oxydative) correspond à une phase de multiplication rapide des organismes alors présents, grâce aux sucres et acides aminés disponibles dans la matière organique labile, et débute avec des températures inférieures à 45°C (mésophile) (Figure 1, phase A). Cette forte activité a pour première conséquence une élévation rapide de la température pouvant atteindre les 70 à 80°C durant les deux premiers jours (FAO 2005) (Figure 1, phases B et C). L'activité des populations microbiennes dites mésophiles est inhibée à ces températures, et d'autres populations microbiennes et fongiques dites thermophiles, leur succèdent. Ces populations thermophiles effectuent à très haute température une importante décomposition de la matière organique. L'augmentation de la température est un paramètre indispensable pour la qualité du compost et son innocuité (hygiénisation).

La phase de maturation succède à celle de décomposition, ou thermophile, et débute par un refroidissement du compost, marqué par un net ralentissement de l'activité microbienne, et une décomposition des fibres végétales par les champignons qui prédominent (Figure 1, phase D). Quand la température devient ambiante, les processus d'humification (réactions secondaires de condensation et polymérisation) dominent et aboutissent à la formation d'humus, dont les acides humiques très résistants à la dégradation. Il se poursuit également une dégradation lente des composés récalcitrants. Cette phase de maturation perdure jusqu'à l'utilisation du compost (Francou, 2004). La durée de compostage est extrêmement variable et la texture du compost final ressemble à celle d'un terreau, de couleur brun foncé à noir, contenant des particules homogènes de petite taille.

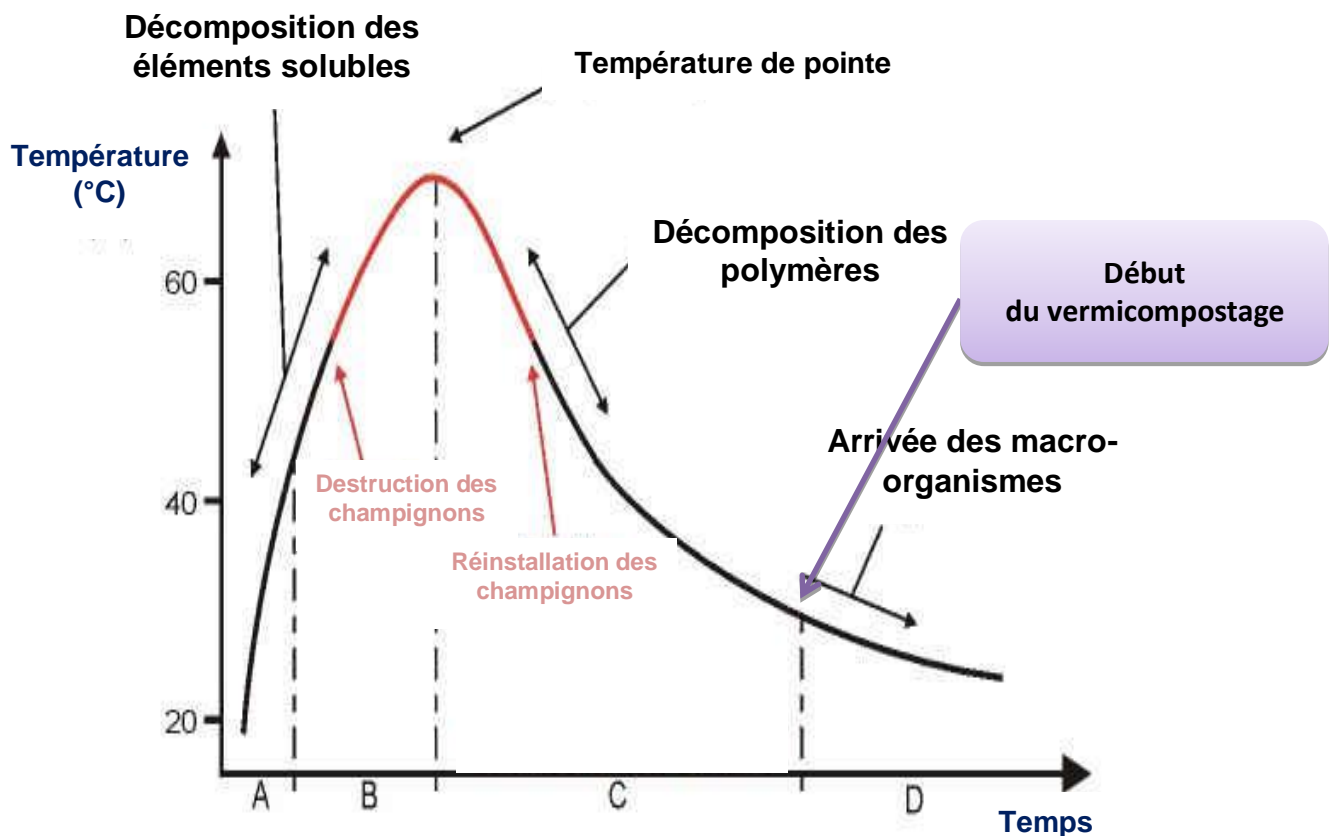


Figure 1: Evolution des températures en fonction du temps, au cours des différentes phases du compostage et vermicompostage

Le processus de pré-compostage peut être contrôlé par la maîtrise de l'aération, du retournement (mélange des matériaux) et de l'arrosage, qui doivent être pris en compte simultanément, puisque la

génération de chaleur métabolique, la température, l'oxygénation et l'humidité sont quatre facteurs interconnectés lors du processus de compostage (Strom, 1985).

2.2 Le vermicompostage sensu stricto

Le vermicompostage peut débuter au cours de la phase de maturation, avant l'obtention de la texture finale du compost, dès que la température avoisine les 30°C (début de la phase D, Figure 1) et les conditions du tas sont favorables à la survie des vers (ex. sans excès d'eau). Durant le processus du vermicompostage, les vers de terre ingèrent les matières solides dont une partie est reconvertie au profit du vers de terre (nourriture), l'autre partie étant rejetée sous la forme de turricules (Loehr *et al.*, 1985), produits plus fragmentés, plus poreux et plus efficace que le matériau initial. La composition des turricules est entièrement liée à la composition du matériau initial et le vermicompostage résulte d'une action combinée des vers de terre, des microbes présents dans l'intestin du vers de terre et dans le déchet organique (Albanell *et al.*, 1988).

Outre des conditions environnementales propices à la croissance et la reproduction des vers, à savoir la température, l'oxygénation et l'humidité adéquates (supérieure à 70%), le choix de l'espèce pour réaliser le vermicompostage est essentiel. Les déplacements des vers favorisant l'aération du tas de déchets, le retournement des déchets est donc moins nécessaire qu'avec un compost classique

2.3 Le rôle des vers de terre

Les vers de terre sont de macroscopiques annélides oligochètes clitellés (Dominguez *et al.*, 2010), il en existe plus de 8000 espèces décrites (Reynolds et Wetzel, 2010). Actuellement une quinzaine d'espèces sont utilisées pour les vermotechnologies (Blakemore, 2000). Les espèces épigées phytophages, les plus couramment utilisées pour le vermicompostage (Figure 2) sont *Eisenia fetida* (Savigny, 1826), *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867), et *Perionyx excavatus* (Perrier, 1872) (Ansari et Ismail, 2012). Cette dernière espèce est reconnue comme une des plus efficaces pour le vermicompostage en conditions tropicales ou subtropicales (Kale, 1998).



Figure 2 : Photos des principales espèces de vers de terres utilisées pour le vermicompostage en zone tropicale: 1: *Eisenia fetida* (Savigny, 1826); 2: *Perionyx excavatus* (Perrier, 1872); 3: *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867)

Pendant leur déplacement et l'ingestion du substrat, ces animaux fousseurs provoquent le mélange du substrat ainsi que la création de tunnels, qui favorisent l'accessibilité de la matière organique aux organismes décomposeurs (Shipitalo *et al.*, 2004 ; Jouquet *et al.*, 2010), et favorisent la circulation de l'air et de l'eau au sein du substrat. De ce fait, l'action des vers peut favoriser le lessivage de certains nutriments solubles tels que les nitrates et le potassium (Sierra *et al.*, 2013) Le mucus sécrété par les

vers de terre peut induire un effet 'priming' (sur-minéralisation) au sein du substrat conduisant à une rapide minéralisation de la matière organique (Lavelle, 2001 ; Gomez-Brandon *et al.*, 2011). L'action des vers de terre a des effets positifs mais peut également avoir des effets inhibiteurs sur l'activité microbienne (Dominguez *et al.*, 2010 ; Aira *et al.*, 2007). L'action combinée des vers de terre et des populations microbiennes peut parfois engendrer une réduction importante de la masse de déchets traitée (Sierra *et al.*, 2013) et par conséquent une réduction du carbone total (Aira *et al.*, 2007).

3. Le vermicompost pour une intensification agro-écologique de la production de petits ruminants au pâturage

Les deux facteurs clés de la production des petits ruminants au pâturage sont leur alimentation et leur état de santé, principalement conditionnée par l'infestation par des nématodes du tube digestif, ou parasitisme gastro-intestinal. L'addition de vermicompost peut avoir une action au niveau de chacun de ces deux facteurs et à ce titre constitue une alternative majeure, dont il reste encore à évaluer l'impact global sur le long terme et au regard des investissements et des performances réalisées. En effet, cette alternative permet en outre le recyclage des effluents d'élevage issus de systèmes de production en bâtiments et la réduction des coûts liés à la fertilisation classique et aux traitements anthelminthiques.

3.1 Rôle fertilisant, pour une meilleure alimentation et le gain de croît

La fertilisation est en effet une des stratégies majeures d'intensification de la production animale au pâturage, parmi d'autres stratégies basées sur le choix des stades de repousse, l'addition de légumineuses ou de suppléments, notamment en zones tropicales (Minson, 1990 ; Humphreys, 1991 ; Poppi *et al.*, 1997 ; Lemaire *et al.*, 2009 ; Boval et Dixon, 2012). On estime en effet des gains de poids vif de l'ordre de 1,3 à 4,7 kg de poids vif par kg additionnel d'azote apporté (Jones, 1990; Humphreys, 1991) principalement dus à l'augmentation des quantités de fourrage produites. Par ailleurs, la valeur nutritive et la concentration en azote sont également accrues (Minson, 1973; Monson et Burton, 1982 ; Boval *et al.*, 2002) favorisant la digestibilité du fourrage et la production de feuilles et de tiges, elles aussi plus digestibles. La fertilisation organique à base de composts et vermicomposts permet par ailleurs l'amélioration de la qualité organique du sol et l'augmentation progressive de la biodisponibilité de nutriments (Jouquet *et al.*, 2011 ; Sierra *et al.*, 2013).

Récemment, dans le cadre d'un appel à projet « AGRIBIO », l'impact bénéfique de l'addition de vermicompost sur les performances animales a été mesuré pour les conditions de la Guadeloupe. Trois lots de 6 agnelles de race Martinik, ont été conduits au pâturage pendant 6 mois au piquet, pour faciliter les mesures individuelles (Boval *et al.*, 2012). Déplacés quotidiennement (30-45 min/jour), les 3 lots étaient conduits en parallèle sur 3 parcelles à un stade de repousse de 21 jours préparées selon trois modalités : i) recevant un apport de vermicompost contenant des vers de terre de compost (VC), ii) recevant un apport de vermicompost duquel les vers de terre ont été retirés ou iii) laissées naturelles telles quelles, servant de témoin (T). Suite à l'addition de vermicompost sur les parcelles VC les performances de croissance des agnelles ont en effet été accrues (68,7 g de croît/j), comparativement aux parcelles C ayant reçu du compost (32.3 g/j) et des parcelles témoins T (32.0 g/j). Les augmentations de poids mesurées (Figure 3) avec le vermicompost sont intervenues dès le second cycle de pâturage, très rapidement suite à l'addition du vermicompost, et se sont maintenues encore au-delà de 7 mois, après un seul apport (à raison de 500 g/m²).

Parallèlement à ces gains de croît, les quantités ingérées ont été en effet accrues sur les parcelles ayant reçu du vermicompost, par rapport aux parcelles témoins (93 vs. 87 g MS/kg PV^{0.75}/jour, P<0.001). La teneur en azote de la biomasse végétale dans les parcelles VC a été nettement plus élevée comparativement aux deux autres traitements (11.4 vs. 10.3 et 10.8 % MS), et peut s'expliquer par l'action des vers de terre qui sont connus pour modifier la disponibilité en minéraux pour le couvert végétal via une augmentation de la minéralisation de la matière organique du sol. En outre, une

évolution de la composition floristique a aussi été observée, en particulier *Killinga sp.*, une cypéracée qui représentait initialement 31 % des espèces présentes et qui a nettement régressé sur les parcelles VC (<15%), au profit du *Dichanthium sp.*, graminée indigène bien consommée par les ruminants (Boval *et al.*, 2007). Certaines espèces peuvent en effet mieux exploiter certains nutriments disponibles que d'autres espèces (Eisenhauer et Scheu, 2008).

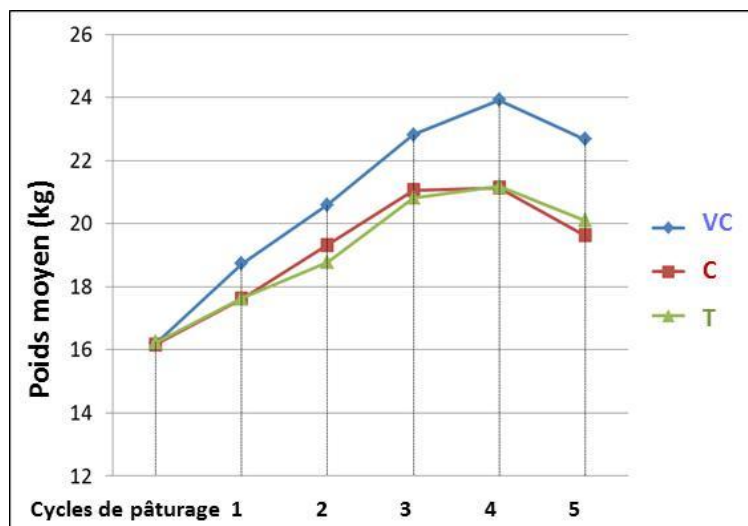


Figure 3 : Evolution du poids vif moyen d'agnelles pâturant des parcelles témoin (T) ou ayant reçu du vermicompost (VC) ou du compost (C), au cours de 4 cycles successifs de pâturage (tous les 21 jours).

3.2 Rôle bénéfique contre le parasitisme gastro-intestinal des petits ruminants

Pour les petits ruminants au pâturage, la première cause de maladie dépend de leur infestation par des nématodes gastro-intestinaux (NGI), avec un effet majeur sur la productivité des troupeaux, les performances de croissance et la reproduction. Près de 40% de la mortalité pré-sevrage serait due au parasitisme par ces nématodes (Aumont *et al.*, 1997b). Le contrôle des NGI repose principalement sur l'utilisation massive de vermifuges, qui a cependant conduit au développement de souches de nématodes résistantes à différentes classes de vermifuges produits. Face à ces résistances majeures, la recherche de diverses stratégies alternatives de lutte sont recherchées, parmi lesquelles l'élevage sélectif d'animaux résistants ou la vaccination des jeunes animaux (Jackson et Miller, 2006), la supplémentation alimentaire en protéines, ou l'utilisation de fourrages à tanins (Niezen *et al.*, 1993). Des stratégies de gestion des pâturages sont également recherchées dont le pâturage mixte (d'Alexis *et al.*, 2013) et l'action d'agents biologiques, tels que les champignons nématophages (Larsen, 2000) et les vers de terre (Waghorn, 2002).

L'effet nématophage des vers de terre a été récemment mesuré sur les stades libres de deux espèces de nématodes gastro-intestinaux (les stades libres d'*Haemonchus* et *Trichostrongylus colubriformis*) dans les matières fécales de chèvres infestées naturellement en pâturage naturel tropical (d'Alexis *et al.*, 2009). Une semaine après l'ajout des vers de terre, des réductions de 29 et 33% respectivement ont été observées pour les deux espèces de nématodes. Des réductions significatives avaient également été reportées en zone tempérée en Nouvelle Zélande, sur des larves de *Teladorsagia* (Waghorn *et al.*, 2002).

Cette action nématophage a également été mise en évidence, en situation directe de pâturage, sur un autre stade du cycle des nématodes, sur la quantité d'œufs excrétés dans les fèces, pour des chevrettes pâturant une parcelle ayant reçu des apports de vermicompost (à raison de 800 g/m de sillon). Des réductions du nombre d'œufs 6 à 13 % ont également été observées en présence de vers

de terre, comparativement au lot témoin. Ces baisses sont intervenues dès le 1^{er} cycle de pâturage et s'est maintenu durant au moins les trois cycles successifs suivants, qui ont fait l'objet de mesures.

L'action nématophage des vers de terre s'expliquerait par l'activité directe ou indirecte des vers de terre Wurst (2010). En effet, l'une des hypothèses avancée serait la consommation directe des nématodes contenus dans le sol par les vers de terre. Dash (1980) a en effet mis en évidence la présence de nématodes dans le tube digestif de vers de terre. Une autre hypothèse serait que l'activité des vers de terre nuirait indirectement aux populations de parasites gastro-intestinaux, en modifiant les propriétés de leur milieu physique, les rendant alors moins efficaces. Ainsi, Loranger *et al.* (2012) pour des nématodes du bananier ont montré que le vers de terre *P. corethrurus* modifie la porosité du sol, ce qui perturbe l'activité du nématode phytopathogène *Radopholus similis*.

Ces hypothèses restent à valider dans diverses conditions, et quoiqu'il en soit, ces premiers résultats quant au rôle nématophage des vers de terre constitue une voie prometteuse, en faveur d'une lutte écologique contre les parasites gastro-intestinaux des ruminants au pâturage.

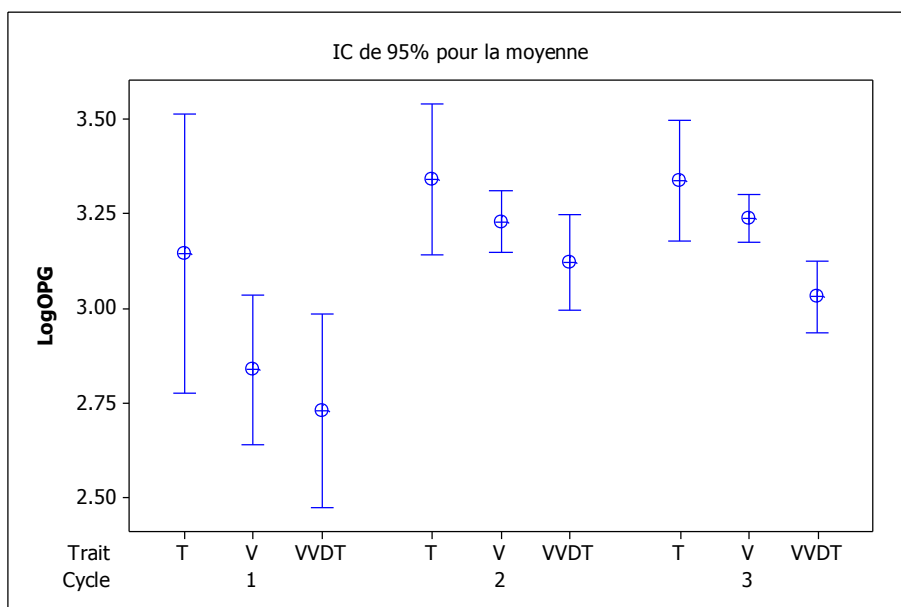


Figure 4: Evolution des œufs de nématodes dans les fèces d'agnelles au pâturage sur des parcelles témoin (T), ayant reçu du vermicompost (VC) ou du compost (C).

Conclusion

Le recours au vermicompost pour intensifier l'exploitation des prairies, apparaît comme une pratique agro-écologique d'intérêt, quand on considère les enjeux associés à une meilleure valorisation des prairies naturelles pour assurer plusieurs fonctions agro-environnementales. Au-delà des bénéfices agronomiques escomptés, notamment le maintien de la qualité des sols et le contrôle du parasitisme gastro-intestinal de petits ruminants), il reste à évaluer l'intérêt économique de cette pratique, en comparaison de conduites plus conventionnelles (la fertilisation minérale et l'utilisation d'anthelminthiques de synthèse). Il conviendra de tenir compte notamment de la faisabilité de cette pratique au regard de la technicité des agriculteurs, et de la pénibilité et du temps de travail, dont la valeur varie d'un système de production à l'autre, étant plus ou moins familial. La mise en évidence de ces bénéfices à diverses échelles et à plus long terme devrait favoriser l'adoption et l'appropriation de ce type de pratique.

Références bibliographiques

- Aira M., Monroy F., Dominguez J., 2007. *Eisenia fetida* (Oligochaeta: Lumbricidae) Modifies the Structure and Physiological Capabilities of Microbial Communities Improving Carbon Mineralization During Vermicomposting of Pig Manure. *Microbial Ecology* 54, 662-671.
- Albanell E., Plaixats J., Cabrero T., 1988. Chemical changes during vermicomposting (*Eisenia fetida*) of sheep manure mixed with cotton industrial wastes. *Biology and Fertility of Soils* 6, 266-269.
- Allard V., Soussana J.F., Falcimagne R., Berbigier P., Bonnefond J. M., Ceschia E., D'Hour P., Henault C., Laville P., Martin C., Pinares-Patino, C., 2007. The role of grazing management for the net biome productivity and greenhouse gas budget (CO₂, N₂O and CH₄) of semi-natural grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 121, 47-58.
- Altieri M.A., 1989. Agroecology - a new research and development paradigm for world agriculture. *Agriculture Ecosystems & Environment* 27, 37-46.
- Ammann C., Flechard C.R., Leifeld J., Neftel A., Fuhrer J., 2007. The carbon budget of newly established temperate grassland depends on management intensity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 121, 5-20.
- Ansari A.A., Ismail S.A., 2012. Earthworms and Vermiculture Biotechnology, In: Kumar, S. (Ed), *Management of Organic Waste*, In tech, pp.87-96
- Aumont G., Chemineau P., 1997. Small ruminants from the tropics - Foreword. *Prod. Anim.* 10, 3.
- Bennett E.M., Peterson G.D., Levitt E.A., 2005. Looking to the future of ecosystem services. *Ecosystems* 8, 125-132.
- Blakemore R.J., 2000. Vermiculture I- ecological considerations of the earthworm species used in vermiculture. In: *Proceedings of the International Conference on Vermiculture and Vermicomposting*, Kalamazoo, Mich, USA, September 2000.
- Boval M., Archimede H., Tournebize R., Coppry O., 2002. Stage of regrowth of tropical forage have various effect on diet quality of grazing heifers Multi-function grasslands: quality forages, animal products and landscapes. *Proceedings of the 19th General Meeting of the European Grassland Federation*, La Rochelle, France, 27-30 May 2002. p 108-109.
- Boval, M., Fanchone F., Archimede H., Gibb.MJ., 2007. Effect of structure of a tropical pasture on ingestive behaviour, digestibility of diet and daily intake by grazing cattle. *Grass and Forage Science* 62: 44-54.
- Boval M., Dixon R.M., 2012. The importance of grasslands for animal production and other functions: a review on management and methodological progress in the tropics. *Animal* 6, 748-762.
- Boval, M., Coppry O., Naves M., Alexandre G., 2012. L'élevage traditionnel, une source et un support pour l'innovation agro-écologique: la pratique du piquet aux Antilles. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*: 87-97.
- d'Alexis, S., Sauvans D., Boval M., 2013. Mixed grazing systems of sheep and cattle to improve liveweight gain: a quantitative review. *The Journal of Agricultural Science FirstView*: 1-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0021859613000622>
- d'Alexis S., Loranger-Merciris G., Mahieu M., Boval M., 2009. Influence of earthworms on development of the free-living stages of gastrointestinal nematodes in goat faeces. *Veterinary Parasitology* 163, 171-174.
- Delgado C.L., 2003. Rising consumption of meat and milk in developing countries has created a new food revolution. *Journal of Nutrition* 133: 3907S-3910S.
- Domínguez J., Aira M., Gomez-Brandon M., 2010. Vermicomposting: Earthworms Enhance the Work of Microbes, In: *Microbes At Work: From Wastes to Resources*, H. Insam, I. Franke-Whittle, M. Goberna, (Eds.), 93-114, Heidelberg, Germany.
- FAO, 2005. Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole. Documents de travail sur la Terre et les Eaux. Misra R.V., Roy R.N., Hiraoka H., Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture: 36.

- FAO, 2009. The state of food and agriculture 2009: Livestock in the balance. State of Food and Agriculture: 166 pp.
- FAO, 2012. Developing a Global Agenda of Action for Sustainable Livestock Sector Development, 2nd Multi-Stakeholder Platform meeting. State of Food and Agriculture: 18 pp.
- Fedoroff N.V. Battisti D. S., Beachy RN., Cooper PJM., Fischhoff DA., Hodges CN., Knauf VC., Lobell D., Mazur B.J., Molden D., Reynolds M.P., Ronald P.C., Rosegrant M.W., Sanchez P.A., Vonshak A., Zhu J.K., 2010. Radically Rethinking Agriculture for the 21st Century. *Science* 327, 833-834.
- Francis C., Lieblein G., Gliessman S., Breland T. A., Creamer N., Harwood R., Salomonsson L., Helenius J., Rickerl D., Salvador R., Wiedenhoft M., Simmons S., Allen P., Altieri M., Flora C., Poincelot R., 2003. Agroecology: The ecology of food systems. *Journal of Sustainable Agriculture* 22, 99-118.
- Francou C., 2004. Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains : Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - Recherche d'indicateurs pertinents. Institut National de la recherche agronomique de Paris-Grignon. Paris: 266pp.
- Gibbs H.K., Ruesch A.S., Achard F., Clayton M.K., Holmgren P., Ramankutty N., Foley J.A., 2010. Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107, 16732-16737.
- Gill M., Smith P., Wilkinson J.M., 2010. Mitigating climate change: the role of domestic livestock. *Animal* 4, 323-333.
- Gomez-Brandon M., Aira M., Lores M., Dominguez J., 2011. Changes in microbial community structure and function during vermicomposting of pig slurry. *Bioresource Technology* 102(5), 4171-4178.
- Gracia A., Loureiro M.L., Nayga R.M., 2011. Valuing an EU Animal Welfare Label using Experimental Auctions. *Agricultural Economics* 42, 669-677.
- Herrero M., Thornton P.K., Gerber P., Reid R. S., 2009. Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 1, 111-120.
- Horlings L.G., Marsden T.K., 2011. Towards the real green revolution? Exploring the conceptual dimensions of a new ecological modernisation of agriculture that could 'feed the world'. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 21, 441-452.
- Humphreys L.R., 1991. Tropical pasture utilisation. Cambridge University Press.
- Jones R.J., 1990. Nitrogen rate and stocking rate effects on steer gains from grazed irrigated pangola grass in the ord valley, western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 30, 599-605.
- Jouquet E.P., Bloquel E., Thu Doan T., Ricoy M., Orange D., Rumpel C., Tran Duc, T., 2011. Do Compost and Vermicompost Improve Macronutrient Retention and Plant Growth in Degraded Tropical Soils? *Compost Science & Utilization* 19, 15-24.
- Jouquet P., Plumerea T., DoanThub T., Rumpelc C., TranDucb T., Orangea D., 2010. The rehabilitation of tropical soils using compost and vermicompost is affected by the presence of endogeic earthworms. *Applied Soil Ecology* 46, 125-133.
- Kale R.D., 1998. Earthworm Cinderella of Organic Farming. Prism Book Pvt Ltd, Bangalore, India. 88 pp.
- Lavelle P., Spain A.V., 2001. 'Soil ecology.' (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, the Netherlands).
- Lemaire G., Da Silva S.C., Agnusdei M., Wade M., Hodgson J., 2009. Interactions between leaf lifespan and defoliation frequency in temperate and tropical pastures: a review. *Grass and Forage Science* 64, 341-353.
- Loehr R.C., Neuhauser E.F., Malecki MR., 1985. Factors affecting the vermistabilization process: Temperature, moisture content and polyculture. *Water Research* 19(10), 1311-1317.
- Ma S., Swinton S.M., 2011. Valuation of ecosystem services from rural landscapes using agricultural land prices. *Ecological Economics* 70, 1649-1659.
- Metera E., Sakowski T., Sloniewski K., Romanowicz B., 2010. Grazing as a tool to maintain biodiversity of grassland - a review. *Animal Science Papers and Reports* 28, 315-334.

- Minson D.J., 1973. Effect of fertilizer nitrogen on digestibility and voluntary intake of *Chloris gayana*, *Digitaria decumbens* and *Pennisetum clandestinum*. Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry 13, 153-157.
- Minson D.J., 1990. Forage in Ruminant Nutrition. Academic Press, Inc San Diego, California.
- Monson W.G., Burton G.W., 1982. Harvest frequency and fertilizer effects on yield, quality, and persistence of eight bermudagrasses. Agronomy Journal 74, 371-374.
- Moss B., 2008. The Water Framework Directive: Total environment or political compromise? Science of the Total Environment 400, 32-41.
- Mundler P., Rumpus L., 2012. The energy efficiency of local food systems: A comparison between different modes of distribution. Food Policy 37, 609-615.
- O'Mara F.P., 2012. The role of grasslands in food security and climate change. Annals of Botany 110, 1263-1270.
- Orr D.M., O'Reagain P.J., 2011. Managing for rainfall variability: impacts of grazing strategies on perennial grass dynamics in a dry tropical savanna. Rangeland Journal 33, 209-220.
- Poppi D.P., 1996. Predictions of food intake in ruminants from analyses of food composition. Aust. J. Agric. Res. 47, 489-504.
- Reynolds J.W., Wetzel M.J., 2010. Nomenclatura Oligochaetologica. Supplementum Quartum. A catalogue of names, descriptions and type specimens of the Oligochaeta, Illinois Natural History Survey Special Publication, Chicago.
- Russelle M.P., Entz M.H., Franzluebbers A.J., 2007. Reconsidering integrated crop-livestock systems in north America. Agronomy Journal 99, 325-334.
- Shipitalo M.J., Le Bayon R.C., 2004. Quantifying the effects of earthworm on soil aggregation and porosity. Earthworm Ecology 10, 183-200.
- Sierra J., Desfontaines L., Faverial J., Loranger-Merciris G., Boval M., 2013. Composting and vermicomposting of cattle manure and green wastes under tropical conditions: carbon and nutrient balances and end-product quality. Soil Research 51(2), 142-151.
- Soussana J.F., Tallec T., Blanfort V., Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. Animal 4, 334-350.
- Strom P.F., 1985. Effect of temperature on bacterial species diversity in thermophilic solid-waste composting. Applied and Environmental Microbiology 50, 899 - 905.
- Tarawali S., Herrero M., Descheemaeker K., Grings E., Bluemmel M., 2011. Pathways for sustainable development of mixed crop livestock systems: Taking a livestock and pro-poor approach. Livestock Science 139, 11-21.
- Waghorn T.S., Leathwick D.M., Chen L.Y., Gray R.A.J., Skipp R.A., 2002. Influence of nematophagous fungi, earthworms and dung burial on development of the free-living stages of *Ostertagia* (*Teladorsagia*) *circumcincta* in New Zealand. Veterinary Parasitology 104, 119-129.
- Wezel A., Bellon S., Dore T., Francis C., Vallod D., David C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. Agronomy for Sustainable Development 29, 503-515.
- Wirsenius S., Azar C., Berndes G., 2010. How much land is needed for global food production under scenarios of dietary changes and livestock productivity increases in 2030? Agricultural Systems 103, 621-638.